



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Електротехнически факултет

Катедра Електроенергетика

Маг. инж. Кристина Юриева Хаджийска

**„Оценяване на сценарии за развитие на
националната енергийна система“**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и
автоматика

Научна специалност: "Електрически мрежи и системи"

Научен ръководител: Проф. д.н. инж. Димо Стоилов

София, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електроенергетика“ към Електротехническият Факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 07.07.2026 г.. Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 2026 г. от часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № на Ректора на ТУ-София в състав:

Вътрешни за ТУ-София членове:

1. доц. д-р инж. Рад Христов Станев – ТУ-София – председател
2. проф. д-р инж. Йорданка Стаменкова Ангелова – ТУ-София – научен секретар

Външни членове:

1. проф. д-р инж. Васил Димитров Димитров – ВТУ „Тодор Каблешков“
2. доц. д-р Атанас Димитров Георгиев – СУ „Св. Климент Охридски“
3. доц. д-р инж. Юлиян Емилов Рангелов – ТУ-Варна

Резервни членове:

1. доц. д-р инж. Ива Димитрова Драганова-Златева, /вътрешен/
2. доц. д-р инж. Николай Деянов Неколаев – ТУ-Варна, /външен/.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически Факултет на ТУ-София, блок № 12, етаж 2 кабинет № 12222.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електроенергетика“ на Електротехнически факултет при ТУ-София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора като част от работата по два научноизследователски проекта.

Автор: Кристина Юриева Хаджийска

Заглавие: **ОЦЕНЯВАНЕ НА СЦЕНАРИИ ЗА РАЗВИТИЕ НА НАЦИОНАЛНАТА ЕНЕРГИЙНА СИСТЕМА**

Тираж: 50 бр.

Издателство при ТУ-София

1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследването на процесите по дългосрочно енергийно планиране и разработването на методологичен подход за моделиране и оценка на сценарии за развитие на националната енергийна система. Актуалността на изследването се определя от динамичните промени в европейската и световната енергетика, необходимостта от изпълнение на целите на Европейската енергийна политика, ускорения преход към нисковъглеродна икономика, повишаването на енергийната сигурност и необходимостта от вземане на научно обосновани стратегически решения при развитието на националния енергиен сектор. За постигане на поставената цел на дисертационния труд е проведено последователно научно изследване, обхващащо всички основни етапи на стратегическото енергийно планиране.

В началния етап на научноизследователската работа е представен анализ на Европейската енергийна политика по тематични области в системната философия и политиката за съвременно управление на Енергийния съюз на Европа, както и на енергийната политика на Република България от приемането ѝ в Европейския съюз до настоящия момент. Представен е и анализ на националните и световните постижения в областта на енергийното планиране, като се акцентира върху идентифицирането на ключови области за бъдещо развитие. Проучването обхваща състоянието на енергийното планиране във водещи държави в Европа и света, като разглежда техните приоритети, стратегически подходи и успешни практики при управлението и трансформацията на енергийните системи. Извършеният анализ позволява да бъдат определени основните направления, в които националното енергийно планиране следва да бъде усъвършенствано с оглед на съвременните предизвикателства пред енергийния сектор.

След извършения анализ е направено подробно изследване на математическите модели, използвани от международни институции, водещи специализирани организации и научни центрове за планиране, прогнозиране и оптимизиране развитието на енергийните системи. Чрез съпоставяне на различните подходи и натрупания международен опит се очертават възможностите за подобрене и направленията, в които националното енергийно планиране може да бъде усъвършенствано, така че да отговори на бъдещите технологични, икономически, екологични и геополитически предизвикателства.

Съществена част от дисертационния труд е посветена на определянето на факторите, влияещи върху развитието на националната енергийна система, както и на обосноваването и изграждането на сценарии за нейното бъдещо развитие. Оценка на енергийни сценарии се разглежда като критичен процес при планирането на енергийните системи, формулирането на политики и разработването на стратегии за смекчаване на изменението на климата. Тъй като енергийните системи се влияят от множество динамични фактори,

включително технологичния напредък, пазарните колебания, регулаторната рамка и геополитическите промени, е необходимо създаването на ясни насоки при избора на сценарии за прогнозиране на бъдещото развитие на енергетиката. В тази връзка са формулирани пет основни изисквания при избора на енергийни сценарии – яснота на допусканията, използване на изчерпателни данни и подходи за моделиране, ангажиране на заинтересованите страни, адаптивност към несигурността и съответствие с целите на енергийната политика. Тези изисквания гарантират, че разработените сценарии са надеждни, реалистични и приложими при стратегическото енергийно планиране.

Оценката на ефективността на различните варианти за развитие на енергийната система представлява сложна задача, изискваща едновременно отчитане на множество показатели/критерий. Поради тази причина в дисертационния труд е представен общ преглед на възможните подходи за многокритериален анализ при оценката на енергийни сценарии. Анализирани са значението, класификацията, видовете и основните етапи на методите за многокритериално вземане на решения. Въз основа на обширен литературен преглед е показано, че дългосрочното енергийно планиране значително се обогатява чрез разглеждането на повече алтернативи, отчитането на външните несигурности и използването на различни критерии за оценка.

Основната цел на дисертационния труд се реализира чрез извършване на количествена оценка на *четири* разработени и моделирани чрез моделната среда LEAP сценарии. За провеждането на сравнителния анализ са адаптирани и приложени три от най-ефективните методи за многокритериално вземане на решения – *Аналитичен йерархичен процес (Analytic Hierarchy Process – AHP)*, *Теория на полезността по множество атрибути (Multi-Attribute Utility Theory – MAUT)* и *Методът за класиране на предпочитанията при оценка на обогатяването (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation – PROMETHEE II)*. Представени и сравнени са количествените оценки по единадесет подкритерия за оценка на енергийните сценарии, групирани в три основни категории – социални, икономически и екологични. Социалните критерии включват *брутен вътрешен продукт, население и индекс на човешкото развитие*; икономическите – *крайно енергийно потребление, брутно производство на електрическа енергия, брутно вътрешно потребление, енергийна интензивност, енергийна ефективност, зависимост от внос и дял на енергията от възобновяеми енергийни източници*; а екологичният критерий е представен чрез *емисиите на въглероден диоксид (CO₂)*. Определени и сравнени са четири основни алтернативи (сценарии) за развитие на националната енергийна система – *Сценарий с дългосрочен преход до 2050 г. (LTT)*, *Сценарий с допълнителни политики и мерки (WAM)*, *Сценарий със засилено използване на възобновяеми енергийни източници (SUP)* и *Сценарий с използване на разпръснати (децентрализирани) производствени мощности (DPC)*.

В заключителната част на дисертацията е извършен анализ на значимостта на получените резултати и са формулирани препоръки относно тяхното ефективно приложение в контекста на енергийното планиране и стратегическото управление. Оценена е

практическата стойност на направените изводи, като е подчертано тяхното значение за подобряване на процесите по вземане на решения, оптимизиране на енергийните стратегии и укрепване на националната енергийна система. Формулираните препоръки имат за цел да подпомогнат прилагането на добри практики, да стимулират внедряването на иновативни подходи и да създадат предпоставки за бъдещи научни разработки в областта на устойчивото развитие на енергийния сектор.

Представеният дисертационен труд е част от усилията за възстановяване и развитие на научноизследователската дейност в областта на енергийното планиране в България. Разработените методологични постановки, извършените анализи и получените резултати създават предпоставки както за по-ефективно стратегическо управление на националната енергийна система, така и за подготовката на ново поколение специалисти в тази от най-важна област на устойчивото развитие, определяща националната сигурност и благосъстояние.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е създаването на цялостен методологичен подход за разработване, моделиране и оценяване на сценарии за развитие на националната енергийна система, основан на съвременни методи за енергийно планиране, математическо моделиране и многокритериално вземане на решения.

Към настоящия момент в България липсва единна методология, която да обединява анализа на европейската и националната енергийна политика, разработването на сценарии за развитие на енергийната система и тяхната последваща оценка чрез съвременни методи за многокритериален анализ. Разработването и оценяването на енергийни сценарии на национално ниво у нас не се извършва. Доколкото е необходимо за изпълнение на европейските ангажименти на страната, то се договаря с доверени на Европейската комисия разработчици. Затова у нас няма формулиране на научно обосновани национални решения за стратегическо енергийно планиране, а енергийното развитие е резултат единствено на сблъсък на интересите на международнационални и национални олигарси.

Предложеният в дисертацията методологичен подход отчита специфичните особености на съвременното развитие на енергийните системи, включително влиянието на технологичния напредък, икономическите процеси, екологичните изисквания, регулаторната рамка и геополитическите фактори. Методологията обединява разработването на алтернативни сценарии, определянето на система от социални, икономически и екологични критерии за тяхната оценка и прилагането на доказани методи за многокритериално вземане на решения с цел извършване на обективен сравнителен анализ на възможните варианти за развитие на националната енергийна система.

Разработването на подобен методологичен подход създава предпоставки за повишаване на обосноваността при изготвянето на стратегически документи и енергийни политики, за подобряване на процесите по вземане на решения и за подпомагане на дългосрочното развитие на националната енергийна система в съответствие с националните и европейските цели за устойчивост, конкурентоспособност и енергийна сигурност.

За постигането на целта са поставени следните задачи:

- 1) Анализ на национални и световни постижения и набелязване на области за развитие.
- 2) Определяне на влияещите фактори, обосноваване и изграждане (определяне на ограничителни параметри) на сценарии за развитие на националната енергийна система.
- 3) Определяне на критерии и подкритерии за сравнение на сценариите.
- 4) Моделиране на сценариите (алтернативите) и получаване на стойностите на критериите и покритериите за оценка; проверки за достоверност; подобрения в моделите.
- 5) Изпълнение на многокритериална оценка по обосновано подбрани методи.
- 6) Анализ и препоръки относно значимост и използване на резултатите.

Методи за изследване

За постигане на поставената цел и решаването на изследователските задачи в дисертационния труд е приложен комплекс от взаимнодопълващи се научноизследователски методи. Проведен е научно-теоретичен анализ на специализирана литература, значими публикации, нормативни и стратегически документи в областта на енергетиката, с цел изследване на съвременните тенденции, подходи и добри практики при енергийното планиране и разработването на сценарии за развитие на енергийните системи.

За моделиране на алтернативните сценарии за развитие на националната енергийна система е използвана моделната среда LEAP (Low Emissions Analysis Platform), която позволява разработване, анализ и сравнение на дългосрочни сценарии в енергийния сектор.

Оценката и сравнителният анализ на разработените сценарии са извършени чрез прилагането на признати методи за многокритериално вземане на решения – Аналитичен йерархичен процес (Analytic Hierarchy Process – AHP), Теория на полезността по множество атрибути (Multi-Attribute Utility Theory – MAUT) и Методът за организация на класирането на предпочитанията при оценка на обогатяването (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation – PROMETHEE II). Прилагането на тези методи е осигурило

възможност за комплексна оценка и обективно сравнение на алтернативните сценарии въз основа на социални, икономически и екологични критерии, като подпомага избора на най-подходящите решения за развитието на националната енергийна система.

Научна новост

Предлага се интегриран методологичен подход за оценка на сценарии за развитие на националната енергийна система, който обединява анализа на енергийната политика, моделирането на сценарии и многокритериалното вземане на решения в единна последователност. Предложени и обосновани са социални, икономически и екологични критерии за комплексно оценяване на алтернативни сценарии за развитие на националната енергийна система, които осигуряват тяхното обективно сравнение и класиране/подреждане. Подходът за оценяване на резултатите от енергийното моделиране (извършено в среда LEAP) е осъществен чрез прилагане на методите за многокритериално вземане на решения АНР, MAUT и PROMETHEE II, позволяващи комплексна оценка на разработените сценарии.

Доказана е приложимостта на разработения методологичен подход чрез неговото използване за оценяване на сценарии за развитие на националната енергийна система. Получените резултати могат да подпомогнат процесите по стратегическо планиране и вземане на решения в енергийния сектор.

Практическа приложимост

Разработената структурирана рамка за оценка и сравнение на алтернативни сценарии за развитие на енергийния сектор е приложима при разработването на стратегически документи и планове за развитие на националната енергийна система. Предложеният подход подпомага процесите по стратегическо енергийно планиране, сравнителен анализ на алтернативни сценарии и вземане на обосновани решения при определяне на дългосрочните насоки за развитие на енергийния сектор, т.е. при съставянето на национална енергийна стратегия.

Апробация

Резултатите от изследванията са представени на Международна конференция за електрически машини, задвижвания и енергийни системи ELMA 2023 г., XIV Научна конференция "БулЕФ 2022", XVI Научна конференция "БулЕФ 2024", 24-ти международен симпозиум по електрически апарати и технологии SIELA 2023 и Национална конференция на Асоциацията на Българските Енергийни Агенции (АБЕА) 2018 г.

Публикации

Основните резултати във връзка с темата на дисертационния труд, са публикувани в 5 статии в рецензирани издания, като 4 от тях са реферирани и индексирани в SCOPUS/Web of science. Една от тях има 4 цитирания от издания в SCOPUS/Web of science.

Структура на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 224 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 262 литературни източници, като 199 са на латиница и 58 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 18 фигури и 27 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Дисертационният труд е структуриран в 5 основни глави, като включва увод и заключение. Към него са приложени резюме, списък на използваната литература, списък на таблиците и фигурите, както и списъци на използваните съкращения, означения и термини.

2. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Обзор върху проблема

Развитието на националните енергийни системи през последните десетилетия преминава през дълбока трансформация, обусловена от икономически, технологични, политически и екологични фактори. Динамиката на енергийните пазари, растящата глобална конкуренция, стремежът към устойчиво икономическо развитие и нарастващите изисквания за климатична неутралност поставят държавите пред необходимостта да реформират своя енергиен сектор. В този контекст оценяването на сценарии за развитие на националната енергийна система се превръща в ключов аналитичен инструмент, който подпомага стратегическото планиране, управлението на риска и вземането на информирани решения от страна на правителствата, енергийните регулатори, инвеститорите, специалистите и обществото.

Енергийната система на една държава е комплекс от взаимосвързани подсистеми – производство, пренос, разпределение, запасяване и потребление на енергия – които функционират под въздействие на технологични ограничения, пазарни условия, регулаторни рамки и социални фактори. Балансирането между надеждност, достъпност и неувреждане на ресурсните запаси и околната среда е едно от най-големите предизвикателства в контекста на съвременната енергийна политика. Същевременно, процесът на преминаване от система, използваща основно изкопаеми горива, към система,

доминирана от възобновяеми енергийни източници и нисковъглеродни технологии, е сложен, многостепен и изисква внимателно стратегическо моделиране.

В този смисъл оценяването на енергийни сценарии представлява методологичен подход, който позволява симулиране на различни възможни варианти на развитие на енергийната система в зависимост от комбинация от фактори – технологични иновации, политически цели, енергийни ресурси, цени на горивата, поведение на потребителите, международни (включително геополитически повлияните) тенденции и климатични изисквания. Сценариите не се стремят да прогнозират бъдещето с абсолютна точност, напротив, те служат за систематизиране на несигурността чрез изследване на множество възможни бъдещи състояния. Това ги превръща в незаменим инструмент при разработването на стратегии в условия на сложност, непредсказуемост и динамични промени.

На международно ниво процесът на оценяване на енергийни сценарии вече е неизменна част от климатичните ангажименти на държавите. Европейският съюз, например, изисква всяка страна членка да разработи национални планове в областта на енергетиката и климата (НПЕК), основани на количествени сценарии. Международната агенция по енергетика (International Energy Agency – IEA) и Междуправителственият панел по климатичните промени (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) също използват сценарийно моделиране за анализ на глобалните енергийни тенденции. Това подчертава необходимостта от надеждни инструменти и методологии, които да позволят на държавите да планират адекватно своите стратегии в контекста на глобалните климатични цели.

Същевременно, за национално ниво е важно моделите и анализите на сценариите да бъдат адаптирани към местните особености – налични и използвани ресурси, икономическа структура, потребителски навици, демография, климатични условия и инфраструктурни ограничения. Тези фактори често определят различни възможности за развитие и различни предизвикателства в сравнение с други държави. Например страни с голям потенциал за възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) могат да развият стратегии, основани на масови инвестиции във вятърна и слънчева енергия, докато страни с ограничен потенциал от този характер може да разчитат на внос на енергия, ядрена енергетика или водородни технологии.

Енергийните системи обаче стават все по-трудни за моделиране. Високият дял на променливи ВЕИ – слънчеви и вятърни мощности – въвежда значителна неопределеност и изменение в системата, което изисква по-висока времева резолюция и по-сложни методи за балансиране. Електрификацията на транспорта и отоплението, използването на изкуствена интелигентност и т.н. също увеличават непредсказуемостта на натоварването, както и нуждата от гъвкави и интелигентни мрежови решения. По този начин оценяването на

сценарии изисква интегрирани модели, които да могат да свържат множество подсистеми и процеси в един динамичен, постоянно променящ се контекст.

През последните години значително се разширява използването на модели за оптимизация на енергийната система (Energy System Optimization Models – ESOMs), които позволяват изчерпателно количествено оценяване на сценарии. Тези модели включват голям брой технологични опции (висока степен на дезагрегиране на потребителски и производствени технологии), ограничения и динамики и често работят с дългосрочни времеви хоризонти до 2050 или 2100 г. Те позволяват да бъдат оценени различни политики и технологични варианти/пътища, както и да се определят най-рентабилните или най-екологичните решения. ESOMs определят оптималния микс от технологии (производствени и потребителски), баланса на енергийни потоци, потреблението в различни сектори и възможностите за намаляване на емисиите, като се вземат предвид множество параметри – разходи, потенциал за развитие, ефективност, гъвкавост, ограничения в инфраструктурата и други.

Класическият подход към оценяването на развитието чрез сценарии предполага сравнения между три основни вида сценарии:

- „Обичайно поведение“, „Бизнес както обикновено“, „Референтен сценарий“, „Базов сценарий“ (Business as usual), което описва бъдещето при запазване на настоящите тенденции и политики;
- Базираните на цели сценарии (целеви сценарии) (Target-based), се отнасят до определяне на подходи за достигане на конкретни цели, например постигане на нулеви емисии до 2050 г. или постигане на определен дял на ВЕИ;
- Оптимизационните сценарии (Cost optimal), които определят икономически или по друг критерий ефективен начин за постигане на дадена цел или група цели.

Всеки от тези видове сценарии има своето значение. Базовите сценарии показват какво би се случило без нови политики, целевите сценарии описват възможните пътища за постигане на предварително зададени цели, а оптимизационните сценарии – кои решения са най-подходящи за постигане на целите по най-ефективният начин. Едно от ключовите предимства на този тип сценариен/вариантен подход е, че той позволява на политиките да направят оценка на „цената на бездействието“, т.е. последствията от липсата на реформи, както и да сравнят ефективността на различни мерки.

Оценката на сценарии за развитие на националната енергийна система е сложен, многопластов и интердисциплинарен процес, който комбинира данни, аналитични инструменти, технологични модели, икономически анализи и политически визии. Той осигурява основата за стратегически решения, които определят дългосрочната енергийна сигурност, икономическото развитие и климатичните усилия на всяка страна. В условията на ускоряващ се енергиен преход, необходимостта от качествени сценарийни оценки става

все по-голяма, а ролята им – все по-централна за увереното определяне на правилната посока за укрепващо развитие.

В противовес на интензивното развитие в икономически напредналите страни, у нас липсват достатъчен научен потенциал и изследвания по развитие на енергетиката. Българската енергетика е изправена пред множество предизвикателства: висока енергоемкост на брутния национален продукт, висока степен на енергийна зависимост, недостатъчна диверсификация на доставките на първични енергоносители, процеси на структурни стопански реформи, които не отчитат адекватно комплексните взаимодействия енергетика – икономика – технологии – околна среда – общество – сигурност – климат и др. Основната цел на предлаганият дисертационен труд е да допринесе за запълване на тази празнина.

Обществено икономическата значимост на докторската тема е обусловена от важността на оценката за ефективността на укрепващото/държеливото енергийно развитие, т. е. определянето на оптималните сценарии към които да бъде насочено развитието. Това е сложна и предизвикателна задача, изискваща внимателна преценка в съответствие с множество критерии/показатели. Определянето на критерии и подходи за многокритериален анализ, които надеждно оценяват държеливостта/устойчивостта (в смисъла на sustainability, а не на stability) е предпоставка за правилна оценка при избор на най-добрия сценарий, съответно определяне на недържеливи/неустойчиви решения по отношение задоволяване на енергопотреблението и тяхното елиминиране, информиране на проектантите за индивидуалните характеристики на алтернативите и за влиянието им върху околната среда. За да отразят правилно проблемите, свързани с устойчивостта/държеливостта на системата, критериите трябва да се отнасят до цялата система в нейното единство и същевременно да отчитат взаимодействието между нейните подсистеми.

Глава I. Планиране на националната енергийна система: международни постижения, стратегически подходи и ключови области за бъдещо развитие

I.1. Роля и значение на енергийното планиране

Планирането на националната енергийна система представлява сложен, дългосрочен и многоизмерен процес, чрез който държавата определя посоката на развитие на своя енергиен сектор с цел осигуряване на устойчиво, надеждно и икономически ефективно енергоснабдяване. В най-широкия си смисъл националното енергийно планиране обхваща анализа и управлението на всички елементи на енергийната система – от добива и вноса на първични енергийни ресурси, през тяхното преобразуване и пренос, до крайното потребление на енергия във всички сектори на икономиката. Научната литература разглежда

този процес като ключов инструмент за изграждане на устойчиво, конкурентоспособно и нисковъглеродно енергийно бъдеще.

Енергийният преход, от своя страна, изисква стратегическо и дългосрочно планиране чрез сценарии, които подпомагат вземането на информирани решения и оценката на рискове и възможности в една все по-сложна енергийна система с много нови участници. Успехът на енергийните политики зависи от включването и ангажирането на възможно най-широк кръг заинтересовани страни, както на национално, така и на общинско ниво, и от използването на техните знания и опит в процеса на нейното формулиране и изпълнение. Затова ангажирането за заинтересованите страни се разглежда като ключов инструмент в енергийното планиране и при управлението на енергийния преход.

I.1.1. Класификация на моделите за енергийно планиране

Математическите модели са основен инструмент при планирането и анализа на енергийните системи. Те се класифицират основно според времевия хоризонт, подхода на моделиране, използваната техника и пространствения обхват. Основните подходи са от горе надолу (top-down) и от долу нагоре (bottom-up).

Моделите от горе надолу анализират връзката между енергетиката и макроикономиката, като оценяват ефектите от енергийни и климатични политики, но имат ограничена технологична детайлност. Моделите от долу нагоре се фокусират върху технологиите, инвестициите и разходите в енергийната система и включват оптимизационни, симулационни, частично равновесни и многоагентни модели.

Съвременните тенденции са насочени към хибридни модели, които съчетават икономически и технологични подходи. Основни предизвикателства остават управлението на несигурността, качеството на входните данни, изчислителната сложност и необходимостта от по-голяма прозрачност на моделите. Енергийното моделиране подпомага разработването на устойчиви енергийни стратегии чрез анализ на потреблението, технологичното развитие и въздействието на различни политики.

I.1.2. Сравнителен анализ на международните подходи за планиране на енергийни системи

В този раздел на дисертационния труд е представен анализ на националните и световните постижения в областта на енергийното планиране, като се акцентира върху идентифицирането на ключови области за бъдещо развитие. Проучването обхваща състоянието на енергийното планиране във водещи държави в Европа и света, като разглежда техните приоритети, стратегически подходи и успешни практики при управлението и трансформацията на енергийните системи.

Направеният обстоен преглед на опита на водещи световни и европейски държави, в лицето на САЩ, Китай и Германия, подчертава, че ключовите фактори за ефективен

енергиен преход са дългосрочна визия, стратегическо планиране, законодателна рамка, активно участие на всички заинтересовани страни и прозрачност в процеса. Направеният анализ показва, че не съществува универсален модел за успешно енергийно планиране. Независимо от различията между отделните държави, успешните стратегии се характеризират с ясни дългосрочни цели, използване на надеждни аналитични модели, стабилна нормативна рамка и активно участие на заинтересованите страни. Бъдещото развитие на енергийните системи ще зависи от способността за интегриране на технологични иновации, икономически фактори, социални аспекти и климатични цели в единна стратегическа рамка.

1.2. Енергийна политика на Европейския съюз (ЕС) и политиката на България

Вторият раздел на Глава 1 анализира енергийната политика на Европейския съюз и енергийната политика на България като страна от ЕС. Анализът представя структуриран преглед на развитието и съдържанието на европейската енергийна политика до настоящия момент и разглежда еволюцията на енергийната политика на България след нейното членство в ЕС, като проследява начина, по който европейските изисквания и цели са повлияли националните стратегически документи и регулаторни подходи.

Енергийната политика на Европейския съюз представлява динамично развиваща се система от стратегически цели, нормативни инструменти и механизми за управление, насочени към гарантиране на сигурна, устойчива и конкурентоспособна енергийна система. След 2000 г. ЕС постепенно преминава от секторен подход към интегриран модел на енергиен преход, който обединява икономически, технологични, екологични и социални измерения. Според Енергийния съюз петте основни цели на енергийната политика на ЕС са: *(1) Диверсификация на европейските източници на енергия, осигуряване на енергийна сигурност чрез солидарност и сътрудничество между страните от ЕС; (2) Гарантиране на функционирането на напълно интегриран вътрешен енергиен пазар, позволяващ свободен поток на енергия през ЕС чрез подходяща инфраструктура и без технически или регулаторни бариери; (3) Подобряване на енергийната ефективност и намаляване на зависимостта от вноса на енергия, намаляване на емисиите и стимулиране на работни места и растеж; (4) Декарбонизиране на икономиката и преминаване към нисковъглеродна икономика в съответствие с Парижкото споразумение; (5) Насърчаване на научните изследвания в областта на нисковъглеродните и чисти енергийни технологии и даване на приоритет на научните изследвания и иновациите за стимулиране на енергийния преход и подобряване на конкурентоспособността.*

Систематичното разглеждане на тематичните области на енергийния съюз, идентифицират ключовите фактори и направления, определящи устойчивото развитие на енергийните системи. България следва европейската енергийна политика, но се отклонява в

някои ключови области. Бързото развитие на ВЕИ и изоставането в енергийната ефективност се дължат на олигархични влияния и недостатъчно адаптиране на европейските механизми към националните условия. Липсата на системно мислене и ниската енергийна култура водят до пропуски в устойчивата, интелектуална и приобщаваща енергийна политика, включително децентрализация на управлението и нови модели за потребление. Стриктното прилагане на директивите на ЕС не гарантира устойчиво развитие, като страната изостава по интегрирани икономически, енергийни и социални показатели, което се налага да бъде поправено чрез нова национална енергийна стратегия.

Международната агенция по енергия (МАЕ), Международна агенция по атомна енергия (МААЕ) и други водещи международни организации са разработили набор от технико-икономически показатели за устойчиво енергийно развитие. Тези показатели представляват стандартизиран инструмент за оценка на състоянието и ефективността на националните енергийни системи и позволяват проследяване на напредъка при изпълнението на националните цели и целите за устойчиво енергийно развитие. В Таблица 2 е представен анализ на избрани индикатори за устойчиво развитие. За първи път аналогични индикатори са публикувани в изследванията. За целите на настоящия дисертационен труд те са актуализирани въз основа на последните налични пълни статистически данни за 2024 г., като е извършено сравнение между България и съседните страни. При анализа се приема, че устойчивото развитие е развитие, което удовлетворявайки потребностите и очакванията на настоящото поколение, предоставя такива възможности и за бъдещите поколения.

Резултатите от анализа показват изоставане на България с десетки години по основни енергоикономически показатели за устойчиво развитие. Изпълнявайки енергийната политика на ЕО, наред с пътя, който трябва да извърви в икономическото си развитие, България следва да насочи усилията си и към няколко взаимосвързани национални цели и проблемни области: **сигурност на функционирането и развитието на енергетиката; ограничаване на въздействието върху климата и чиста енергия; ефективност на енергийния баланс; ресурсна и технологична оптимизация и иновации в енергетиката; развитие на Европейския енергиен пазар и либерализация на вътрешните енергийни пазари; разрешаване на институционалните проблеми на управлението в енергетиката, детайлно анализирани в Глава 1 на дисертационния труд.**

Таблица 2. Къде е България?

Страна/ Показател за 2024 г.	Австрия	Дания	Франция	Германия	Италия	Гърция	България	Румъния	Унгария
Население, млн.	9,159	5,961	68,467	83,456	58,971	10,401	6,445	19,067	9,585
БВП, млрд. евро по текущи цени за 2024 г.	494,088	392,401	2 919,89	4 328,970	2 199,620	236,736	104,767	353,633	206,040
БВП на жител, евро/жител	53 946	65 828	42 647	51 781	37 300	22 761	16 255	18 547	21 496
Потребление на първична енергия, млн. т.н.е.	29,3	15,5	211,0	232,0	131,3	21,0	16,6	29,6	22,2
Потребление на първична енергия на жител, т.н.е./жител	3,20	2,60	3,08	2,78	2,23	2,02	2,58	1,55	2,32
Зависимост от вноса на горива и енергия, %	53,322	38,229	40,060	66,802	73,854	77,714	41,936 65,673**	30,356	48,997
Ефективност на енергийния баланс, КЕП/ПЕП, %	82,9	85,2	61,8	79,8	83	78,6	59,6	79,1	76,1
Енергийна интензивност, кг.н.е./1000 евро	73,86	57,85	84,79	65,17	61,85	83,81	101,51	51,73	83,83
Отношение "енергийна интензивност на България" / "енергийна интензивност на страна"	1,37	1,75	1,19	1,56	1,64	1,21	1,00	1,96	1,21
Брутно производство на ел. енергия, ГВтч	82 407	33 733*	570 713	511 881*	264 716*	49 917*	38 535	57 983*	35 546*
Брутно производство на ел. енергия на жител, кВтч/жител	8 997	5 659	8 336	6 133	4 489	4 799	5 979	3 041	3 709
Електроенергийна интензивност, ГВтч/млн. евро	0,018	0,014	0,029	0,001	0,002	0,020	0,057	0,008	0,018
Отношение "електроенергийна интензивност на България" / "електроенергийна интензивност на страна"	3,167	4,071	1,965	57	28,5	2,85	1	7,135	3,17
Дял на комбинираното производство общото производство на електроенергия, %	5,13	6,11*	1,56	5,63*	13,22*	5,44*	1,63	2,52*	2,27*
Дял на природния газ в потреблението на първична енергия, %	16,95	8,51	12,88	24,89	35,03	21,01	14,32	26,91	31,87
Емисии на CO ₂ , т/жител	6,213	4,373	4,085	7,115	5,310	4,998	5,353	3,559	4,209

Източник: Евростат, <https://ec.europa.eu/eurostat/home?>; <https://ourworldindata.org/grapher/gas-share-energy?tab=table>

*По последни налични данни за 2023 г.

** През 2024 г., според данни на Евростат, енергийната зависимост на страната от горива и енергия е 41.936 % [\[nrg_ind_id\] Energy imports dependency](#), което е значително по-ниско от средната стойност за страните членки на ЕС. Това се дължи на методологията, възприета от Евростат, според която ядрената енергия се отчита като местен енергиен източник. Чрез методологията за изчисление на енергийната зависимост [Energy imports dependency \(nrg_ind_id\)](#) и при отчитане на ядрената енергия като внос [Общ енергиен баланс](#), реалната енергийната зависимост на страната от горива и енергия за 2024 г. е 65,673 %.

Глава II. Изисквания относно избора на енергийни сценарии. Критерии за оценка на сценарии за развитие на националната енергийна система

II.1. Значение на сценарийното планиране

Разработването на дългосрочни енергийни сценарии е най-добрият начин да се обединят демографски, икономически, социални и технологични знания с разбирането за екологичните системи и свързаните с тях проблеми. Сценариите служат като инструмент за

идентифициране на промени и за анализ на взаимовръзките между различни перспективи и възможности. Те позволяват провеждането на структурирани дебати между заинтересованите страни и институциите, за да се изследват алтернативните пътища на енергийния преход и техните последици.

II.2. Класификация на сценарии

Сценариите се различават значително по начина на тяхното разработване и могат да придобиват много форми. Те могат да се различават по географски обхват, секторен обхват, времеви хоризонт и по базата на използваните модели или експертни оценки. Сценариите се различават основно според декларираната цел на тяхното развитие. Сценариите за развитие на енергийните системи варират по обхват, методология и цели и все още няма универсална типология, която да обхваща всички подходи. Най-често те се класифицират според основните въпроси, на които отговарят – какво ще се случи, какво може да се случи и как може да се постигне определена цел. В тази връзка се разграничават три основни типа сценарии: прогнозни, изследователски и нормативни. Прогнозните сценарии анализират вероятното бъдеще, изследователските сценарии разглеждат възможни варианти при различни допускания, а нормативните сценарии определят пътища за постигане на конкретни цели, като например декарбонизация на енергийния сектор. Сценариите могат да бъдат качествени, базирани на наративи и експертни оценки, или количествени, използващи модели и числени анализи, като всеки подход има своите предимства и ограничения.

II.3. Изисквания за избор на енергийни сценарии

Изборът на енергийни сценарии е критичен процес при процесите на планиране на енергийните системи, формулирането на политики и стратегиите за смекчаване на изменението на климата. Тъй като енергийните системи са повлияни от множество динамични фактори, включително технологичен напредък, пазарни колебания, регулаторни рамки и геополитически промени, от съществено значение е да има ясни насоки при избора на сценарии за прогнозиране на бъдещето на енергетиката. Тази глава очертава пет основни изисквания за избор на енергийни сценарии: *яснота на допусканията, изчерпателни данни и съответно подходящи подходи за моделиране, ангажиране на заинтересованите страни, адаптивност към несигурността и съответствие с целите на политиката*. Тези изисквания гарантират, че избраните сценарии са надеждни, уместни и способни да насочват стратегическите решения в енергийното планиране.

II.4. Критерии за оценка на сценарии за развитие на националната енергийна система

Определянето на критериите за оценка е първата стъпка в устойчивото развитие, проектирането и мониторинга. Критериите са инструменти за комуникация на енергийни въпроси, свързани с устойчивото развитие и за насърчаване на институционалния диалог. Те трябва да отразяват цялостността на системата, както и взаимодействието на нейните

подсистеми; в противен случай те не съответстват на сложността на проблемите, свързани с устойчивостта на различните системи. Използваните критерии за оценка на системите за енергоснабдяване в литературата се разделят главно на четири аспекта:

- ✓ *Технически критерии.* Използва се за оценка на наличието и адекватността на институционалната рамка за поддържане на ефективна енергийна система.
- ✓ *Икономическите критерии.* Използват се за оценка на моделите на производство и потребление на енергия и качеството на енергийните услуги.
- ✓ *Екологичните критерии.* Използват се за оценка на въздействието на енергийните системи върху околна среда, положителните или отрицателните тенденции в качеството на земята, водата и на въздуха.
- ✓ *Социалните критерии.* Използват се за оценка на въздействието на енергийните системи върху човешкото благосъстояние. Наличието на енергийни услуги оказва влияние върху бедността, възможностите за работа, образованието, развитието на общността и културата, демографския преход, замърсяването на закрито и здравето.

Приоритетите или интересите на различните заинтересовани страни могат да бъдат взети предвид чрез подбор на конкретните критерии от състава на всяка група, които да участват при оценката. Например, продължителността на живота, инвестиционните разходи, разходите за експлоатация и поддръжка може да са най-важните фактори за инвеститорите. Междувременно емисиите на въглероден диоксид, земеползването и потреблението на вода са най-важните въпроси за правителствата, а създаването на работни места и безопасността са най-големите проблеми за местните общности. В тази глава от дисертационният труд е представен подробен списък и изчерпателни пояснения на значимостта на критериите за оценка на енергийните системи, като отчитаме всички гледни точки на ключовите заинтересовани страни.

Глава III. Моделиране на сценарии за развитие на националната енергийна система

Тази глава на дисертационния труд представя подробно описание на определените варианти (алтернативи) за развитие на енергийната система. Алтернативите (сценариите) са разработени със стремеж за представителност, т.е. изхождайки от текущото състояние на националната енергийна система да се предвидят значимите възможни посоки за развитие, които би могло да бъдат реализирани в зависимост от съществуващи и бъдещи съчетания на фактори: външни (геостратегически и търговски интереси на световните сили и корпорации) и вътрешни (политически решения и интереси на националните играчи). Сравнението на сценариите по този начин дава възможност за избор на най-желания от тях и залагането му в национална енергийна стратегия. Възможните отклонения при действителното развитие се отразяват и конкретизират в по-краткосрочните планове. Тази глава представя разработените в моделна среда LEAP и оценени по обосновано подбрани критерии действително възможни сценарии за развитието на националната енергетика. За

целите на дисертационният труд са определени следните основни и подлежащи на изследване сценарии: Сценарий за дългосрочен преход (long-term transition scenario (LTS)); Сценарий с допълнителни политики и мерки (with additional policies and measures (WAM)); Сценарий със засилено използване на фотоволтаици (scenario with strong utilization of photovoltaics (SUP)) и Сценарий с използване на разпръснати (децентрализирани) производствени мощности (a scenario with the use of dispersed (decentralized) production capacities (DPC)).

Глава IV. Подходи за многокритериален анализ на сценарии за развитие на енергийната система

Подходите за многокритериален анализ (Multi-criteria analysis approaches – МСAA) се очертават като ценни инструменти за подпомагане на процеса на планиране на развитието на енергийните системи, предоставяйки структурирана рамка за вземане на решения, която отчита редица фактори и перспективи. В тази глава на дисертационния труд е представен общ преглед на значението и класификацията на методите за многокритериален анализ, както видовете и основните стъпки на основната процедура за многокритериално вземане на решения. Разгледано е и как подходите за многокритериален анализ могат да се използват за оценка на сценарии за развитие на енергетиката, като подчертаваме ползите от дългосрочното енергийно планиране и вземането на решения по многокритериален подход. Чрез отразяване на външни несигурности и прилагане на различни критерии за оценка, техниките за многокритериален анализ могат да обогатят процеса на вземане на решения, предоставяйки ценна информация за най-добрия път напред в развитието на енергийната система.

IV.1. Описание на подхода за многокритериален анализ

Многокритериалният анализ (МСА) представлява съвкупност от методи и инструменти, предназначени за формално включване на множество цели и критерии при анализа и оценката на алтернативи. Основното му предимство е възможността едновременно да отчита технически, икономически, екологични и социални аспекти, което го прави широко приложим при решаването на сложни задачи в различни области, включително енергийното планиране. Независимо от разнообразието на използваните методи, повечето подходи следват обща последователност от стъпки: **Определяне на опция (алтернатива):** предложен алтернативен курс на действие за справяне с възприеман проблем; **Определяне на цел:** конкретна цел, спрямо която се оценява всяка предложена алтернатива; **Избор на критерий:** измерим фактор, който определя ефективността на алтернативата по отношение на дадена цел, позволяващ измерване на това до каква степен дадена алтернатива отговаря на тази цел; **Оценка на ефективността:** числено представяне на ефективността на дадена опция спрямо конкретна цел или критерий. Тази оценка се определя по дадена скала (например диапазонът от скали, които могат да се използват за измерване, може да варира примерно от 0 до 1, от 1 до 100 или от -5 до +5). **Определяне на тегловия коефициент на даден критерий** – критерий, определящ нивото на важност на дадена цел и съответния критерий спрямо другите разглеждани цели и критерии; Пълният процес на многокритериалния анализ обикновено налага включването на две допълнителни стъпки. Шестата стъпка е **комбиниране на теглото и резултата** на всяка алтернатива, за да

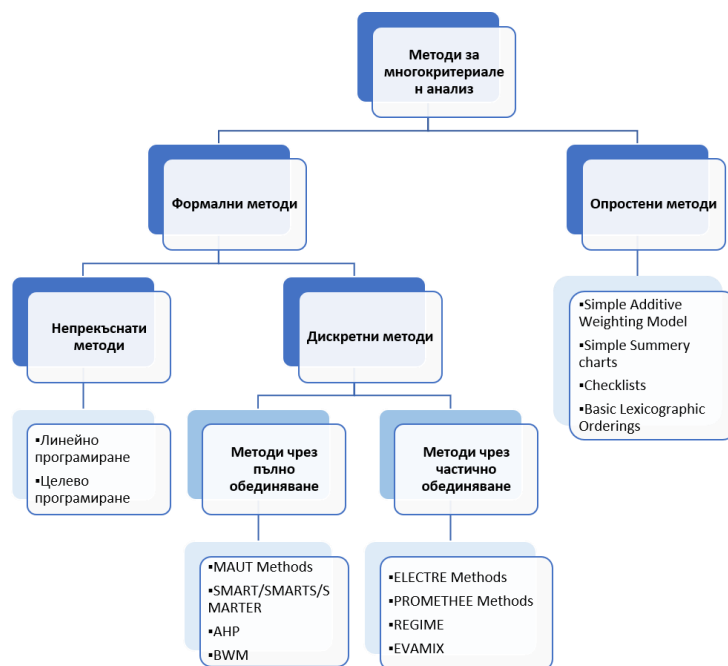
се получи обща оценка. Последната стъпка на МСА е извършване на анализ на чувствителността на резултатите спрямо промени в оценките или теглата.

Благодарение на своята гъвкавост и възможността за адаптиране към конкретни задачи, МСА се утвърждава като един от най-широко използваните подходи за подпомагане на процеса на вземане на решения.

IV.2. Методи за многокритериален анализ

Прегледът на литературата показва широко приложение на методите за многокритериално вземане на решения (Multi-Criteria Decision-Making – MCDM) при оценка и избор на алтернативи чрез едновременно отчитане на количествени и качествени показатели с цел определяне на най-подходящо решение, стратегия или политика. Тези методи намират приложение в широк спектър от области, включително енергетика, транспорт, управление на водните ресурси, околна среда, икономика и публично управление. Описаните методи включват: аналитичен йерархичен процес (Analytic Hierarchy Process – АНР), аналитичен мрежов процес (Analytic network process – ANP), метод за организиране и класиране на предпочитанията за обогатяване на оценката (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations – PROMETHEE), елиминиране и селекция, преобразуващи реалността (Elimination and choice translating reality – ELECTRE), модел на претеглено произведение (Weighted product model – WPM), модел на претеглена сума (Weighted sum model – WSM), техника за опростено подреждане по много атрибути (Simple multi attribute rating technique – SMART), анализ чрез обгръщане/обхващане на данни (Data envelopment analysis – DEA), оценка на симулиран диапазон на неопределеност (Simulated uncertainty range evaluations – SURE), техника за подреждане на предпочитанията по критерии на сходство с идеални решения (preference order technique by similarity to ideal solutions – TOPSIS), компромисно програмиране (trade-off programming) и теория на полезността по множество атрибути (Multi attribute utility theory – MAUT) и др.

Различните методи се характеризират със специфични процедури за оценка, определяне на тегла на критериите и класиране на алтернативите, което позволява избор на подходящ подход според конкретния изследователски проблем. В зависимост от начина на обработка и оценка на информацията методите се разделят на формални и опростени подходи (Фигура 16). Формалните методи използват строги математически процедури, алгоритми за сравнение и класиране на алтернативи и обикновено изискват компютърна помощ при тяхното прилагане. Въпреки по-високата си сложност, те осигуряват по-структуриран и аналитичен подход при вземането на решения. Благодарение на своята гъвкавост и възможност за интегриране на различни критерии, MCDA се утвърждава като ефективен инструмент за анализ на сложни системи, включително при оценка и сравнение на енергийни сценарии.



Фигура 16. Класификация на методите за многокритериален анализ

Глава V. Многокритериален анализ на сценариите за развитие на националната енергийна система

V.1. Въведение

Целта на тази глава на дисертационния труд е да представи и сравни количествени оценки на някои от тези възможни критерии за оценка на сценарии за енергийно развитие, при прилагане на три широко използвани многокритериални метода: Теория на полезността на множество атрибути (MAUT), Аналитичен йерархичен процес (AHP) и Методът за организация на класирането на предпочитанията за оценка на обогатяването (PROMETHEE II) (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation).

V.2. Избор на критерии за количествена оценка

Целта на този раздел от дисертационния труд е да представи определените количествени стойности на критериите (подкритериите и алтернативите) за оценка на сценария за развитие на енергетиката, които са получени като резултат на енергийното планиране чрез LEAP за всеки съответен сценарий (Таблица 26).

Таблица 26. Стойности на критериите, и подкритериите за съответните алтернативи (моделираните чрез LEAP енергийни сценарии)

Критерии за оценка на сценарий				Алтернативи			
Критерии	Подкритерий (ПК)	Мерни единици	Символ	Сценарий WAM	Сценарий SUP	Сценарий LTS	Сценарий DPC
Социални	БВП	евро на глава от населението	ПК 1	15 553	33 707	15 465	15 133
	Население	млн. души	ПК 2	6	8,9	5,4	5.65
	Индекс на човешкото развитие	от 0 до 1	ПК 3	0.894	0.935	0.935	0.915
Икономически	Крайно енергийно потребление	хил.т.н.е.	ПК 4	10 667	6 992	4 089	9120
	Брутно производство на електрическа енергия	хил.т.н.е.	ПК 5	4 362	5 192	4558	4 660
	Първично енергийно потребление	хил.т.н.е.	ПК 6	17 561	9 965	8747	13710
	Енергийна интензивност	т.н.е./1000 евро	ПК 7	17.56	9.97	8.75	13.71
	Ефективност на енергийния баланс	%	ПК 8	61	70	47	67
	Зависимост от внос	%	ПК 9	39	0	0	35.19
	Дял на енергия от възобновяеми енергийни източници	%	ПК 10	33	100	100	42
Екологични	Емисии на CO2	млн. тона	ПК 11	10.79	0	-4.65	2.5

V.3. Многокритериална оценка на различните изследвани сценарии

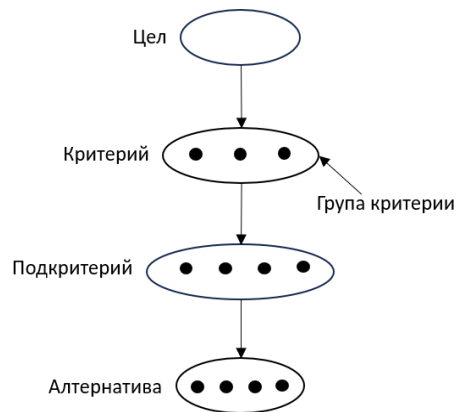
Целта на този раздел в дисертационния труд е да представи приложението на избраните методи за многокритериално вземане на решения (MCDM) при сравнителна оценка на четирите енергийни сценария, моделирани чрез LEAP. Разделът описва последователността на изпълнените процедури (стъпки), използваните критерии и подкритерии за оценка, както и получените резултати от прилагането на отделните методи. Въз основа на извършената многокритериална оценка се анализират и сравняват резултатите от различните сценарии с цел определяне на най-подходящия измежду тях като отправен по отношение бъдещото развитие на енергийната система.

Разделът допринася както за идентифицирането на най-подходящ сценарий за развитие, така и за оценката на приложимостта на различните многокритериалните методи в процесите на енергийно планиране и вземане на решения.

А. Многокритериална оценка чрез Аналитичен йерархичен процес (АНР)

Този метод е структуриран около йерархична дървовидна система, която включва цели (вземане на решения), критерии, подкритерии и алтернативи. Методът АНР включва няколко важни етапа (стъпки):

1. Организиране компонентите на разглеждания проблем за вземане на решения в йерархия (Фигура 3):
 - а) Определяне на основната цел на вземането на решение, която трябва да бъде постигната;
 - б) Дефиниране на критериите и подкритериите, на които се основава решението;
 - в) Идентифициране на алтернативите.
2. Създаване на матрица за сравнение по двойки с относителната важност на различните критерии (подкритерии) и алтернативи по отношение на целта на решението, чрез използването на основната скала на Саати. Диагоналните елементи на матрицата са 1. Когато стойността на елемента (i, j) е по-голяма от 1, тогава факторът (критерият) в ред i е по-значим от фактора в колона j , в противен случай факторът в колона j е по-значим от този в ред i . Когато един критерий J е по-малко важен от друг i , тогава елементът (j, i) на матрицата е реципрочната стойност на елемента (i, j) , т.е. имаме съотношения от 1 („еднакво важни/маловажни“) до $1/9$ („изключително маловажни“).



Фигура 17. Йерархична структура на АНР метода

3. Нормализиране на матрица за сравнения по двойки. Нормализираната матрица за сравнения по двойки се изчислява като: всеки от елементите на колоната се дели на сумата от всички елементи в колоната.

4. Изчисляване на теглата на критериите. Теглата на критериите се изчисляват чрез осредняване на всички елементи в един ред и разделяне на полученото число на броя критерии.
5. Оценка на съгласуваността. Съгласуваността предполага преценка от страна на вземащия решения по отношение на сравненията по двойки. Коефициентът на съгласуваност (CR), който измерва съгласуваността на резултата, се изчислява чрез разделяне на Индекса на съгласуваност (CI) на Индекса на случайна съгласуваност (RI).

$$CR = CI / RI < 10 \%,$$

където Индексът на съгласуваност (CI) на матрицата за сравнение по двойки се изчислява като:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

и $\lambda_{\max}$ е максималната собствена стойност, а n е размерът на матрицата за сравнение по двойки.

6. Определяне на комплексната оценка на всеки от сценариите

Комплексната оценка на сценариите се получава чрез прилагане на метода АНР върху йерархично структурираните критерии и подкритерии, последвано от определяне на тегловите коефициенти, проверка на съгласуваността и формиране на крайното класиране на сценариите. Данните от получената оценка са представени в следващата таблица:

Критерии	Подкритерии	Алтернативи			
		WAM Scenario	LTS Scenario	SUP Scenario	DPC Scenario
Социални	БВП	0.121	0.200	0.121	0.121
	Население				
	Индекс на човешкото развитие				
Икономически	Крайно енергийно потребление	-0.093	-0.028	-0.115	-0.115
	Брутно производство на електрическа енергия				
	Първично енергийно потребление				
	Енергийна интензивност				
	Ефективност на енергийния баланс				
	Зависимост от внос				
	Дял на енергия от ВЕИ				
Екологични	Емисии CO ₂	-0.600	0.000	0.259	-0.139
Обща оценка		-0.573	0.172	0.264	-0.133
Класиране / Подреждане		4	2	1	3

Резултатите от многокритериалната оценка показват ясно разграничаване между разглежданите сценарии. **Сценарий SUP** получава най-висока комплексна оценка (**0.264**) и се класира на първо място благодарение на най-доброто представяне по екологичния критерий, който има решаващо влияние върху крайното класиране. **Сценарий LTS** заема второ място (**0.172**), като се отличава с добри социални и икономически показатели. **Сценарий DPS** се класира на трето място (**-0.133**), а **Сценарий WAM** е последен (**-0.573**). Получените резултати показват, че екологичният критерий е определящ за крайното класиране, докато различията в социалните и икономическите оценки са сравнително малки. Въз основа на извършената оценка чрез метода АНР, **Сценарий SUP** се определя като най-подходящата алтернатива.

Б. Многокритериална оценка чрез Теория на полезността по множество атрибути (MAUT)

Теория на полезността по множество атрибут (MAUT) е широко използван инструмент за вземане на решения при съобразяване на множество критерии. В този процес на вземане на решения, определянето на общата оценка на алтернативата се получава чрез отчитане на пределните приноси на всеки критерий към оценката на алтернативите. Методът MAUT включва следните основни етапи:

- 1) Конструирание на матрицата на решенията.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{0j} & \dots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n},$$

- 2) Изчисляване на нормализирана матрица на решенията. В процеса на нормализиране стойностите на всички критерии първо се преобразуват, за да се удовлетворят изискванията най-добрата и максимална възможна стойност да бъде 1, а най-лошата и минимално възможна стойност да бъде 0.

- а) За критериите, които е необходимо да се максимизират

$$U_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

- б) За критериите, които е необходимо да се минимизират

$$U_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

Където x_{ij} е съответният елемент на матрицата на решенията, $U_{ij} (x_{ij})$ е елемент от нормализираната матрица на решенията, $\max (x_{ij})$ и $\min (x_{ij})$ представляват съответно максималния и минималния елемент във векторите стълб x_j .

Изчисляване на полезността на алтернативата – агрегиране на оценката за максимални ползи на алтернативите по различните критерии.

$$U_j = \sum_{i=1}^{n_i} w_i * n_{ij}$$

където U_j е полезността на алтернативата j , n_{ij} е нормализирана стойност на критерий i за алтернатива j , а w_i е теглото на i -тия критерий.

3) Определяне на тегловите коефициенти на нормализираната матрица от данни.

4) Избор на най-добрите алтернативи: Те са с най-висока стойност на полезност U_j .

Резултатите от приложението на метода АНР за оценка на разглежданите сценарии са представени в следващата таблица:

Алтернатива /Подкритерий	ПК 1	ПК 2	ПК 3	ПК 4	ПК 5	ПК 6	ПК 7	ПК 8	ПК 9	ПК10	ПК11	Сума на приоритетност	Ранг
Сценарий WAM	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.065	4
Сценарий SUP	0.16	0.03	0.16	0.05	0.03	0.11	0.03	0.09	0.09	0.03	0.11	0.892	1
Сценарий LTS	0.00	0.00	0.16	0.09	0.01	0.13	0.03	0.00	0.09	0.03	0.16	0.697	2
Сценарий DPC	0.00	0.00	0.08	0.02	0.01	0.05	0.01	0.08	0.01	0.00	0.09	0.363	3

Резултатите от приложението на метода MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) показват ясно разграничаване между оценяваните сценарии по отношение на тяхната обща полезност. Крайното класиране е: **Сценарий SUP** – първо място с обща оценка **0.892**, следван от **Сценарий LTS (0.697)**, **Сценарий DPC (0.363)** и **Сценарий WAM (0.065)**.

SUP Сценарият е най-подходящата алтернатива, тъй като осигурява най-висока обща полезност и най-добър баланс между отделните критерии. Разликите между сценариите се определят от степента, в която всяка алтернатива удовлетворява съвкупността от заложените подкритерии.

В. Многокритериална оценка с метод PROMETHEE II

Методът PROMETHEE II обикновено включва следните основни стъпки:

- 1) Конструирание на матрицата на решенията, определяне на критериите ($j=1, \dots, k$) и множеството от възможни алтернативи в задачата за вземане на решения;
- 2) Определяне на теглата w_j на критериите:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

3) Нормализиране на матрицата на решенията

а) За оценка на ползи от даден критерий се използва следната формула

$$R_{ij} = [(X_{ij}) - \min (X_{ij})] / [\max (X_{ij}) - \min (X_{ij})]$$

б) За оценка на разходите от даден критерий се използва следната формула

$$R_{ij} = [\max (X_{ij}) - (X_{ij})] / [\max (X_{ij}) - \min (X_{ij})],$$

където X_{ij} са стойностите на оценката, получени от вземащите решения $i = 1, 2, \dots, n$; и броят на критериите $j = 1, 2, \dots, k$.

4) Определяне на отклонението чрез сравнение по двойки

$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$, където $d_j(a, b)$ представя разликата между оценката на критерий a и критерий b .

5) Изчисляване на общата функция на предпочитанията

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \text{ с } \forall x \in [-\infty, \infty], 0 \leq F(x) \leq 1,$$

Където $P_j(a, b)$ представлява функцията на разликите между оценките на алтернатива a по отношение на алтернатива b по всеки критерий. Стойността е в диапазона от 0 до 1.

6) Определяне на индекса на многокритериалното класиране (изпреварване, предпочитане, превъзходване).

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k [W_j * P_j(a, b)] / [\sum_{j=1}^k W_j]$$

където W_j е теглото, което представлява относителната важност на критерий j .

7) Изчисляване на положителния и отрицателния поток на превъзходство на всяка алтернатива

а) За положителния поток на превъзходство се използва следната формула:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

б) За отрицателния поток на превъзходство се използва следната формула:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

8) Изчисляване на нетния поток на превъзходство на всяка алтернатива

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j$$

В таблицата са представени резултатите от прилагането на метода PROMETHEE II върху изследваните енергийни сценарии и полученото класиране на алтернативите:

Алтернатива	Положителен поток	Отрицателен поток	Нетен поток	Класиране
Сценарий WAM	0.039	0.543	-0.504	4
Сценарий SUP	0.561	0.081	0.480	1
Сценарий LTS	0.327	0.201	0.127	2
Сценарий DPC	0.184	0.286	-0.102	3

Резултатите от направената оценка с метода PROMETHEE II, базирани на изчислените стойности на нетния поток, показват ясно разграничаване между разглежданите сценарии. Нетният поток представлява баланса между положителните и отрицателните предпочитания и определя степента, в която всяка алтернатива превъзхожда или е превъзхождана от останалите.

Въз основа на крайното изчисление, използващо метода PROMETHEE II върху пределната стойност на полезността, е определено, че обективно най-добрата/най-подходящата алтернатива според резултатите от оценката е алтернатива – **Сценарий SUP**. Алтернатива е избрана, защото има най-висока стойност на полезността, а именно 0.480. Алтернативи **Сценарий LTS (0.127)**, **Сценарий DPC (-0.102)** и **Сценарий WAM (-0.504)** следват последователно.

Изводът от този раздел е, че различните методи за многокритериална оценка на сценарии дават еднакви или много близки резултати, ако първоначалната оценка на важността на критериите (теглата) е еднаква. Следователно, не е от решаващо значение кой от тези методи се използва. Наистина важно за процедурата по енергийно планиране е правилният избор на критериите за оценка на сценариите (базирани на екологичните, обществените и икономическите цели) и правилното определяне на тяхната относителна важност. В съвременния сложен свят обаче не е допустимо да се вземат решения само въз основа на един или два критерия или, както е в случая с националната ни енергийна система, въз основа на желанието да се угодят на някои големи играчи на пазара. Задължително е да се прилагат методи за оценка по множество критерии.

Приноси на дисертационния труд

1. Научно-приложни приноси

- 1) В резултат на анализ на специализирана литература и стратегически документи в областта на енергийното планиране е обоснована необходимостта от приложението на национален процес за стратегическо енергийно планиране.
- 2) Систематизирани и адаптирани са методи/подходи и критерии за оценка на енергийни сценарии, позволяващи комплексно отчитане на въздействията върху икономическото развитие, енергийната сигурност, социалното благосъстояние и опазването на околната среда при дългосрочното енергийно планиране.

- 3) Предложени и обосновани са алтернативни сценарии за развитие на националната енергийна система, моделирани чрез среда (LEAP).
- 4) Извършена е многокритериална количествена оценка и сравнителен анализ на алтернативните сценарии за развитие на националната енергийна система чрез прилагането на методите АНР, МАУТ и PROMETHEE II. Това позволява обективно класиране/подреждане на разглежданите варианти и подпомага избора на стратегически решения в енергийния сектор.

2. Приложни приноси

- 1) Създадена е структурирана рамка за оценка и сравнение на алтернативни сценарии за развитие на енергийния сектор, която може да бъде използвана при разработване, актуализиране и обосноваване на национални енергийни стратегии, планове и програми. Разработеният подход, дава възможност за интегриране на експертни оценки и предпочитания на заинтересованите страни при определянето на относителната важност на избраните критерии, което ще повиши прозрачността и обществената възприемчивост на решенията при енергийното планиране.
- 2) Приложени и валидирани са методи за многокритериален анализ (АНР, МАУТ, PROMETHEE II) като инструментариум за оценка на енергийни сценарии, който може да подпомага институции и експерти при вземане на обосновани и информирани решения.

Списък на публикациите по дисертационния труд

- [1] Стнс. дтн. Пламен Цветанов, инж. Кристина Хаджийска, Енергийната политика на ЕС и политиката на България, Асоциация на българските енергийни агенции, 2018 г.
- [2] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Criteria for Evaluation of Scenarios for National Energy System Development," *2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021174.
- [3] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Multi-Criteria Analysis Approaches for Energy System Development Scenario — Review," *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-9, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202557.
- [4] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Multicriterial Quantitative Estimations for Evaluation of Scenarios for Development of the Bulgarian National Energy System," *2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 2024, pp. 1-8, doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637808.

[5] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "New Goals: Updates of National Energy Planning Scenarios," *2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794851.

Assessment of scenarios for the development of the national energy system

PhD Dissertaion

Author: MSc eng. Kristina Hadzhiyska

SUMMARY

The present PhD thesis is dedicated to the investigation of long-term energy planning processes and the development of a methodological framework for modelling and evaluating scenarios for the development of the national energy system. The relevance of the research is determined by the profound transformation of energy systems worldwide, driven by technological progress, economic changes, geopolitical factors, increasing requirements for energy security, and the transition towards a low-carbon economy. The need for scientifically based approaches supporting strategic decision-making in the energy sector defines the importance of developing reliable methods for analysing and comparing alternative pathways for energy system development.

The thesis presents a comprehensive study covering the main stages of strategic energy planning. Initially, an analysis of European and national energy policies is performed, focusing on the evolution of the Energy Union framework, the objectives of European energy and climate policies, and the development of Bulgaria's energy policy after its accession to the European Union. International experience and good practices in energy planning are examined, with emphasis on approaches applied in leading countries and their potential adaptation to national conditions.

A detailed review of mathematical models and analytical approaches used by international institutions, research centres, and specialised organisations for energy system modelling, forecasting, optimisation, and scenario analysis is provided. Based on this analysis, the main factors influencing the development of national energy systems are identified, including technological, economic, environmental, regulatory, social, and geopolitical aspects. The thesis emphasises that energy scenarios should not be considered as predictions of the future but as structured representations of possible development pathways under different assumptions and constraints.

Four alternative scenarios for the development of the national energy system are proposed and modelled using the Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP): Long-Term Transition Scenario (LTS), With Additional Measures Scenario (WAM), Scenario with Enhanced

Renewable Energy Sources Development (SUP), and Scenario Based on Decentralised Production Capacities (DPC). The evaluation of the developed scenarios is performed using three widely applied multicriteria decision-making methods: Analytic Hierarchy Process (AHP), Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE II). Eleven evaluation indicators are considered and grouped into three main categories: social, economic, and environmental criteria. The social criteria include gross domestic product, population, and human development index; the economic criteria include final energy consumption, gross electricity generation, gross inland energy consumption, energy intensity, energy efficiency, energy import dependency, and share of renewable energy sources; while the environmental criterion is represented by carbon dioxide emissions.

The results obtained from the multicriteria assessment provide a comparative evaluation of the investigated scenarios and identify the most suitable alternatives according to the selected criteria. Different methods for multi-criteria scenario assessment give the same or very close results if the initial assessment of the importance of the criteria (weights) is the same. Therefore, it is not crucial which of these methods is used. What is really important for the energy planning procedure is the correct choice of the criteria for evaluating the scenarios (based on environmental, social and economic objectives) and the correct determination of their relative importance.

The developed methodological framework contributes to improving the process of strategic energy planning by integrating scenario modelling, quantitative evaluation indicators, and multicriteria decision analysis. The proposed approach can support policymakers, energy planners, and stakeholders in the formulation of more informed strategies aimed at achieving sustainable development, energy security, economic efficiency, and compliance with long-term European energy and climate objectives.

Contributions of the dissertation

1. Scientific and applied contributions

- 1) As a result of an analysis of specialized literature and strategic documents in the field of energy planning, the need for the implementation of a national strategic energy planning process has been justified.
- 2) Methods/approaches and criteria for assessing energy scenarios have been systematized and adapted, allowing for a comprehensive consideration of the impacts on economic development, energy security, social welfare and environmental protection in long-term energy planning.
- 3) Alternative scenarios for the development of the national energy system, modeled through the environment (LEAP), have been proposed and justified.

- 4) A multi-criteria quantitative assessment and comparative analysis of the alternative scenarios for the development of the national energy system has been carried out by applying the AHP, MAUT and PROMETHEE II methods. This allows for an objective ranking/ordering of the considered options and supports the selection of strategic decisions in the energy sector.

1. Applied contributions

- 1) A structured framework for the assessment and comparison of alternative scenarios for the development of the energy sector has been created, which can be used in the development, updating and justification of national energy strategies, plans and programs. The developed approach allows for the integration of expert assessments and preferences of stakeholders in determining the relative importance of the selected criteria, which will increase the transparency and public acceptability of decisions in energy planning.
- 2) Multi-criteria analysis methods (AHP, MAUT, PROMETHEE II) have been applied and validated as a toolkit for the assessment of energy scenarios, which can assist institutions and experts in making justified and informed decisions.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Faculty of Electrical Engineering

Department of Electrical Power Engineering

MSc eng. Kristina Yurieva Hadzhiyska

**Assessment of scenarios for the development of the
national energy system**

SYNOPSIS

of a dissertation for the award of an educational and scientific degree
"DOCTOR"

Area: 5. Technical Sciences

Professional field: 5.2. Electrical engineering, electronics and automation

Scientific specialty: "Electrical networks and systems"

Scientific supervisor: Prof. DSc Eng. Dimo Stoilov

Sofia, 2026 г.

The dissertation has been discussed and directed for defense by the Department Council of the Department of Electrical Power Engineering at the Faculty of Electrical Engineering of the Technical University of Sofia at a regular meeting held on 07.07.2026. The public defense of the dissertation will take place on from in the Conference Hall of the BIC of the Technical University - Sofia at an open meeting of the scientific jury, determined by order No. of the Rector of the Technical University of Sofia, consisting of:

Internal for TU-Sofia:

1. Assoc. Prof. Eng. PhD Rad Hristov Stanev – TU-Sofia – Chairman
2. Prof. Eng. PhD Yordanka Stamenkova Angelova – TU-Sofia – scientific secretary

External for TU-Sofia:

1. Prof. Eng. PhD Vasil Dimitrov Dimitrov – HTS „Todor Kableshev“
2. Assoc. Prof. PhD Atanas Dimitrov Georgiev – SU „St. Kliment Ohridski“
3. Assoc. Prof. Eng. PhD Yulian Emilov Rangelov – TU-Varna

Reserve members:

1. Assoc. Prof. Eng. PhD Iva Dimitrova Draganova – Zlateva, TU-Sofia /internal/
2. Assoc. Prof. Eng. PhD Nikolay Deianov Nikolaev – TU-Varna, /external/.

The materials for the defense are available to those interested in the office of the Faculty of Electrical Engineering of the Technical University of Sofia, block № 12, floor 2, office № 12222.

The candidate is a part-time doctoral student at the Department of Electrical Power Engineering of the Faculty of Electrical Engineering. The research for the dissertation was carried out by the author, and the results of these are presented and analyzed in this dissertation.

Author: Kristina Yurieva Hadzhiyska

Dissertation title: **ASSESSMENT OF SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF THE NATIONAL ENERGY SYSTEM**

Circulation: 30 copies

Publishing House at TU-Sofia

1. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Relevance of the problem

This dissertation is dedicated to the study of the processes of long-term energy planning and the development of a methodological approach for modeling and assessing scenarios for the development of the national energy system. The relevance of the study is determined by the dynamic changes in the European and global energy sector, the need to implement the goals of the European energy policy, the accelerated transition to a low-carbon economy, the increase in energy security and the need to make scientifically sound strategic decisions in the development of the national energy sector. To achieve the set goal of the dissertation, a consistent scientific study was conducted, covering all the main stages of strategic energy planning.

In the initial stage of the research work, an analysis of the European energy policy by thematic areas in the systemic philosophy and policy for modern management of the Energy Union of Europe, as well as the energy policy of the Republic of Bulgaria from its accession to the European Union to the present, is presented. An analysis of national and global achievements in the field of energy planning is also presented, with an emphasis on identifying key areas for future development. The study covers the state of energy planning in leading countries in Europe and the world, examining their priorities, strategic approaches and successful practices in the management and transformation of energy systems. The analysis performed allows to determine the main directions in which national energy planning should be improved in view of the modern challenges facing the energy sector.

Following the analysis, a detailed study of the mathematical models used by international institutions, leading specialized organizations and scientific centers for planning, forecasting and optimizing the development of energy systems was conducted. By comparing the different approaches and the accumulated international experience, the opportunities for improvement and the directions in which national energy planning can be improved are outlined, so as to meet future technological, economic, environmental and geopolitical challenges.

A significant part of the dissertation work is devoted to the determination of the factors influencing the development of the national energy system, as well as the justification and construction of scenarios for its future development. The assessment of energy scenarios is considered a critical process in the planning of energy systems, the formulation of policies and the development of strategies for mitigating climate change. Since energy systems are influenced by numerous dynamic factors, including technological progress, market fluctuations, the regulatory framework and geopolitical changes, it is necessary to create clear guidelines for the selection of scenarios for predicting the future development of the energy sector. In this regard, five main requirements have been formulated for the selection of energy scenarios - clarity of assumptions, use of comprehensive data and modeling approaches, involvement of stakeholders, adaptability to uncertainty and compliance with energy policy objectives. These requirements ensure that the developed scenarios are reliable, realistic and applicable in strategic energy planning.

The assessment of the effectiveness of different options for the development of the energy system is a complex task, requiring the simultaneous consideration of multiple indicators/criteria. For this reason, the dissertation presents a general overview of possible approaches for multi-criteria analysis in the assessment of energy scenarios. The significance, classification, types and main stages of multi-criteria decision-making methods are analyzed. Based on an extensive literature review, it is shown that long-term energy planning is significantly enriched by considering more alternatives, taking into account external uncertainties and using different assessment criteria.

The main objective of the dissertation is realized by performing a quantitative assessment of *four* developed and modeled scenarios using the LEAP modeling environment. Three of the most widely used multi-criteria decision-making methods were used to conduct the comparative analysis – *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)* and the *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) II*. The quantitative assessments are presented and compared for eleven sub-criteria for assessing the energy scenarios, grouped into three main categories – social, economic and environmental. The social criteria include gross domestic product, population and human development index; the economic criteria – final energy consumption, gross electricity production, gross domestic consumption, energy intensity, energy efficiency, import dependence and share of energy from renewable energy sources; and the environmental criterion is represented by carbon dioxide (CO₂) emissions. Four main alternatives (scenarios) for the development of the national energy system have been identified and compared – *Long-term transition scenario (LTT)*, *Scenario with additional policies and measures (WAM)*, *Scenario with strong utilization of photovoltaic (SUP)* and *Scenario using dispersed (decentralized) production capacities (DPC)*.

The final part of the dissertation analyzes the significance of the results obtained and formulates recommendations for their effective application in the context of energy planning and strategic management. The practical value of the conclusions drawn is assessed, emphasizing their importance for improving decision-making processes, optimizing energy strategies and strengthening the national energy system. The formulated recommendations aim to support the implementation of good practices, stimulate the implementation of innovative approaches and create prerequisites for future scientific developments in the field of sustainable development of the energy sector.

The presented dissertation is part of the efforts to restore and develop scientific research in the field of energy planning in Bulgaria. The developed methodological statements, the performed analyses and the obtained results create prerequisites for both more effective strategic management of the national energy system as well as for the preparation of a new generation of specialists in this most important area of sustainable development, determining national security and well-being.

Purpose and objectives of the dissertation

The aim of the dissertation is to create a comprehensive methodological approach for developing, modeling and evaluating scenarios for the development of the national energy system, based on modern methods for energy planning, mathematical modeling and multi-criteria decision-making.

Currently, Bulgaria lacks a unified methodology that would unify the analysis of European and national energy policies, the development of scenarios for the development of the energy system and their subsequent assessment through modern methods of multi-criteria analysis. The development and assessment of energy scenarios at the national level is not carried out in our country. To the extent necessary for the implementation of the country's European commitments, it is negotiated with developers entrusted to the European Commission. Therefore, in our country there is no formulation of scientifically sound national solutions for strategic energy planning, and energy development is the result solely of a clash of interests between transnational and national oligarchs.

The methodological approach proposed should take into account the specific features of the modern development of energy systems, including the influence of technological progress, economic processes, environmental requirements, regulatory framework and geopolitical factors. The methodology combines the development of alternative scenarios, the definition of a system of social, economic and environmental criteria for their assessment and the application of established methods for multi-criteria decision-making in order to carry out an objective comparative analysis of possible options for the development of the national energy system.

The development of such a methodological approach creates prerequisites for increasing the validity of the preparation of strategic documents and energy policies, for improving decision-making processes and for supporting the long-term development of the national energy system in accordance with the European goals for sustainability, competitiveness and energy security.

To achieve the set goal, the following tasks have been performed:

- 1) Analysis of national and global achievements and identification of areas for development.
- 2) Determination of the influencing factors, justification and construction (determination of limiting parameters) of scenarios for the development of the national energy system.
- 3) Determination of criteria and sub-criteria for comparing the scenarios.
- 4) Modeling the scenarios (alternatives) and obtaining the values of the evaluation criteria and criteria; credibility checks; model improvements.
- 5) Implementation of a multi-criteria assessment using reasonably selected methods.

- 6) Analysis and recommendations regarding the significance and use of the results.

Research methods

To achieve the set goal and solve the research tasks in the dissertation, a complex of mutually complementary scientific research methods is applied. A scientific and theoretical analysis of the specialized literature, significant publications, normative and strategic documents in the field of energy was carried out, with the aim of researching modern trends, approaches and good practices in energy planning and the development of scenarios for the development of energy systems.

To model the alternative scenarios for the development of the national energy system, the LEAP (Low Emissions Analysis Platform) modeling environment was used, which allows for the development, analysis and comparison of long-term scenarios in the energy sector.

The evaluation and comparative analysis of the developed scenarios were carried out by applying recognized multi-criteria decision-making methods – Analytic Hierarchy Process (AHP), Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) II. The application use of these methods provides an opportunity for a comprehensive evaluation and objective comparison of alternative scenarios based on social, economic and environmental criteria, supporting the selection of the most appropriate solutions for the development of the national energy system.

Scientific novelty

An integrated methodological approach for the assessment of scenarios for the development of the national energy system is proposed, which unites the analysis of energy policy, scenario modeling and multi-criteria decision-making in a single sequence. Social, economic and environmental criteria for a comprehensive assessment of alternative scenarios for the development of the national energy system are proposed and justified, which ensure their objective comparison and ranking/ordering. The approach to assessing the results of the energy modeling (performed in the LEAP environment) is implemented by applying the multi-criteria decision-making methods AHP, MAUT and PROMETHEE II, allowing for a comprehensive assessment of the developed scenarios.

The applicability of the developed methodological approach has been proven through its use for assessing scenarios for the development of the national energy system. The results obtained can support the processes of strategic planning and decision-making in the energy sector.

Practical applicability

The developed structured framework for the assessment and comparison of alternative scenarios for the development of the energy sector is applicable in the development of strategic documents and plans for the development of the national energy system. The proposed approach supports the processes of strategic energy planning, comparative analysis of alternative scenarios and making informed decisions in determining the long-term directions for the development of the energy sector, i.e. in the development of a national energy strategy.

Approbation

The research results were presented at the International Conference on Electrical Machines, Drives and Energy Systems ELMA 2023, XIV Scientific Conference "BulEF 2022", XVI Scientific Conference "BulEF 2024", 24th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2023 and National Conference of the Association of Bulgarian Energy Agencies (ABEA) 2018.

Publications

The main results related to the topic of the dissertation have been published in 5 articles in peer-reviewed journals, 4 of which are referenced and indexed in SCOPUS/Web of Science. One of them has 4 citations from publications in SCOPUS/Web of Science.

Structure of the dissertation

The dissertation is 224 pages long and includes an introduction, 5 chapters to address the formulated main tasks, a list of main contributions, a list of publications on the dissertation and references. A total of 262 literary sources are cited, 199 of which are in Latin and 58 in Cyrillic, and the rest are Internet addresses. The work includes a total of 18 figures and 27 tables. The numbers of the figures and tables in the abstract correspond to those in the dissertation.

The dissertation is structured in 5 main chapters, including an introduction and a conclusion. It is accompanied by a summary, a list of references, a list of tables and figures, as well as lists of abbreviations, symbols and terms used.

2. CONTENT OF THE DISSERTATION

Problem overview

The development of national energy systems in recent decades has undergone a profound transformation, driven by economic, technological, political and environmental factors. The dynamics of energy markets, growing global competition, the pursuit of sustainable economic development and the increasing demands for climate neutrality have forced countries to reform their energy sectors. In this context, the assessment of scenarios for the development of the national

energy system is becoming a key analytical tool that supports strategic planning, risk management and informed decision-making by governments, energy regulators, investors, specialists and society.

A country's energy system is a complex of interconnected subsystems – energy production, transmission, distribution, storage and consumption – that operate under the influence of technological constraints, market conditions, regulatory frameworks and social factors. Balancing reliability, availability and non-damage to resource reserves and the environment is one of the greatest challenges in the context of modern energy policy. At the same time, the process of transition from a system based mainly on fossil fuels to a system dominated by renewable energy sources and low-carbon technologies is complex, multi-stage and requires careful strategic modeling.

In this sense, energy scenario assessment is a methodological approach that allows simulating different possible options for the development of the energy system depending on a combination of factors - technological innovations, political goals, energy resources, fuel prices, consumer behavior, international (including geopolitically influenced) trends and climate requirements. Scenarios do not seek to predict the future with absolute accuracy, on the contrary, they serve to systematize uncertainty by examining multiple possible future states. This makes them an indispensable tool in developing strategies in conditions of complexity, unpredictability and dynamic changes.

At the international level, the process of assessing energy scenarios is now an integral part of countries' climate commitments. The European Union, for example, requires each member state to develop National Energy and Climate Plans (NECPs) based on quantitative scenarios. The International Energy Agency (IEA) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) also use scenario modelling to analyze global energy trends. This highlights the need for robust tools and methodologies to enable countries to adequately plan their strategies in the context of global climate goals.

At the same time, at the national level, it is important that models and scenario analyses are adapted to local specificities – available and used resources, economic structure, consumer habits, demographics, climatic conditions and infrastructure constraints. These factors often determine different development opportunities and different challenges compared to other countries. For example, countries with high potential for renewable energy sources (RES) may develop strategies based on massive investments in wind and solar energy, while countries with limited potential of this nature may rely on energy imports, nuclear power or hydrogen technologies.

However, energy systems are becoming increasingly difficult to model. The high share of variable RES – solar and wind power – introduces significant uncertainty and variability into the system, which requires higher time resolution and more sophisticated balancing methods.

Electrification of transport and heating, the use of artificial intelligence, etc. also increase the unpredictability of the load, as well as the need for flexible and intelligent grid solutions. Thus, scenario assessment requires integrated models that can connect multiple subsystems and processes in a dynamic, constantly changing context.

In recent years, the use of Energy System Optimization Models (ESOMs) has been significantly expanded, allowing for comprehensive quantitative assessment of scenarios. These models include a large number of technological options (high degree of disaggregation of consumption and production technologies), constraints and dynamics, and often work with long-term time horizons up to 2050 or 2100. They allow for the assessment of different policy and technological options/pathways, as well as for the determination of the most cost-effective or environmentally friendly solutions. ESOMs determine the optimal mix of technologies (production and consumption), the balance of energy flows, consumption in different sectors and the possibilities for reducing emissions, taking into account multiple parameters – costs, development potential, efficiency, flexibility, infrastructure constraints and others.

The classic approach to assessing development through scenarios involves comparisons between three main types of scenarios:

- “Business as usual”, “Reference scenario”, “Baseline scenario”, which describes the future if current trends and policies are maintained;
- Target-based scenarios (target scenarios) (Target-based), refer to determining approaches to achieving specific goals, for example achieving zero emissions by 2050 or achieving a certain share of RES;
- Optimization scenarios (Cost optimal), which determine an economically or otherwise effective way to achieve a given goal or group of goals.

Each of these types of scenarios has its own meaning. Baseline scenarios show what would happen without new policies, target scenarios describe possible paths to achieve pre-set goals, and optimization scenarios – which solutions are most suitable for achieving the goals in the most effective way. One of the key advantages of this type of scenario/variant approach is that it allows policymakers to assess the “cost of inaction,” i.e. the consequences of a lack of reforms, as well as to compare the effectiveness of different measures.

The assessment of scenarios for the development of the national energy system is a complex, multi-layered and interdisciplinary process that combines data, analytical tools, technological models, economic analyses and political visions. It provides the basis for strategic decisions that determine the long-term energy security, economic development and climate efforts of each country. In the context of an accelerating energy transition, the need for quality scenario assessments is becoming ever greater, and their role is increasingly central to confidently determining the right direction for sustainable development.

In contrast to the intensive development in economically advanced countries, our country lacks sufficient scientific potential and research on energy development. Bulgarian energy is faced with numerous challenges: high energy intensity of the gross national product, high degree of energy dependence, insufficient diversification of primary energy supplies, processes of structural economic reforms that do not adequately take into account the complex interactions of energy - economy - technology - environment - society - security - climate, etc. The main goal of the proposed dissertation is to contribute to filling this gap.

The socio-economic significance of the doctoral topic is determined by the importance of assessing the effectiveness of sustainable energy development, i.e. determining the optimal scenarios towards which development should be directed. This is a complex and challenging task, requiring careful assessment in accordance with multiple criteria/indicators. Determining criteria and approaches for multi-criteria analysis that reliably assess sustainability (in the sense of sustainability, not stability) is a prerequisite for a correct assessment when choosing the best scenario, respectively, determining unsustainable solutions in terms of satisfying energy consumption and their elimination, informing designers about the individual characteristics of the alternatives and their impact on the environment. In order to correctly reflect the problems related to the sustainability of the system, the criteria must relate to the entire system in its unity and at the same time take into account the interaction between its subsystems.

Chapter I. National Energy System Planning: International Achievements, Strategic Approaches and Key Areas for Future Development

I.1. Role and importance of energy planning

National energy system planning is a complex, long-term and multidimensional process through which a country determines the direction of development of its energy sector in order to ensure a sustainable, reliable and cost-effective energy supply. In its broadest sense, national energy planning encompasses the analysis and management of all elements of the energy system – from the extraction and import of primary energy resources, through their transformation and transmission, to the final consumption of energy in all sectors of the economy. The scientific literature considers this process as a key tool for building a sustainable, competitive and low-carbon energy future.

The energy transition, in turn, requires strategic and long-term planning through scenarios that support informed decision-making and the assessment of risks and opportunities in an increasingly complex energy system with many new actors. The success of energy policies depends on the inclusion and engagement of the widest possible range of stakeholders, both at national and municipal level, and on the use of their knowledge and experience in the process of its formulation and implementation. Therefore, stakeholder engagement is considered a key tool in energy planning and in the management of the energy transition.

I.1.1. Classification of energy planning models

Mathematical models are a fundamental tool in the planning and analysis of energy systems. They are mainly classified according to the time horizon, the modeling approach, the technique used and the spatial scope. The main approaches are top-down and bottom-up.

Top-down models analyze the relationship between energy and the macroeconomics, assessing the effects of energy and climate policies, but have limited technological detail. Bottom-up models focus on technologies, investments and costs in the energy system and include optimization, simulation, partial equilibrium and multi-agent models.

Current trends are towards hybrid models that combine economic and technological approaches. The main challenges remain the management of uncertainty, the quality of input data, the computational complexity and the need for greater transparency of the models. Energy modeling supports the development of sustainable energy strategies by analyzing consumption, technological developments and the impact of different policies.

I.1.2. Comparative analysis of international approaches to energy system planning

This section of the dissertation presents an analysis of national and global achievements in the field of energy planning, with an emphasis on identifying key areas for future development. The study covers the state of energy planning in leading countries in Europe and the world, examining their priorities, strategic approaches and successful practices in the management and transformation of energy systems.

The comprehensive review of the experience of leading global and European countries, represented by the USA, China and Germany, emphasizes that the key factors for an effective energy transition are a long-term vision, strategic planning, legislative framework, active participation of all stakeholders and transparency in the process. The analysis shows that there is no universal model for successful energy planning. Regardless of the differences between individual countries, successful strategies are characterized by clear long-term goals, the use of reliable analytical models, a stable regulatory framework and active participation of stakeholders. The future development of energy systems will depend on the ability to integrate technological innovations, economic factors, social aspects and climate goals into a single strategic framework.

I.2. Energy policy of the European Union (EU) and the policy of Bulgaria

The second section of Chapter 1 analyses the energy policy of the European Union and the energy policy of Bulgaria as an EU country. The analysis presents a structured overview of the development and content of the European energy policy to date and examines the evolution of Bulgaria's energy policy since its EU membership, tracing the way in which European requirements and objectives have influenced national strategic documents and regulatory approaches.

The energy policy of the European Union is a dynamically developing system of strategic objectives, regulatory instruments and governance mechanisms aimed at ensuring a secure, sustainable and competitive energy system. Since 2000, the EU has gradually moved from a sectoral approach to an integrated model of energy transition that brings together economic, technological, environmental and social dimensions. According to the Energy Union, the five main objectives of the EU energy policy are: *(1) Diversification of European energy sources, ensuring energy security through solidarity and cooperation between EU countries; (2) Ensuring the functioning of a fully integrated internal energy market, allowing the free flow of energy across the EU through appropriate infrastructure and without technical or regulatory barriers; (3) Improving energy efficiency and reducing energy import dependency, reducing emissions and stimulating jobs and growth; (4) Decarbonising the economy and shifting to a low-carbon economy in line with the Paris Agreement; (5) Promoting research in low-carbon and clean energy technologies and prioritizing research and innovation to drive the energy transition and improve competitiveness.*

The systematic examination of the thematic areas of the Energy Union identifies the key factors and directions determining the sustainable development of energy systems. Bulgaria follows the European energy policy, but deviates in some key areas. The rapid development of RES and the lag in energy efficiency are due to oligarchic influences and insufficient adaptation of European mechanisms to national conditions. The lack of systematic thinking and low energy culture lead to gaps in sustainable, intellectual and inclusive energy policy, including decentralization of governance and new consumption models. Strict implementation of EU directives does not guarantee sustainable development, and the country lags behind in integrated economic, energy and social indicators, which needs to be corrected through a new national energy strategy.

The International Energy Agency (IEA), the International Atomic Energy Agency (IAEA) and other leading international organizations have developed a set of technical and economic indicators for sustainable energy development. These indicators represent a standardized tool for assessing the state and efficiency of national energy systems and allow tracking progress in implementing national goals and objectives for sustainable energy development. Table 2 presents an analysis of selected indicators for sustainable development. For the first time, similar indicators have been published in research. For the purposes of this dissertation, they have been updated based on the latest available complete statistical data for 2024, and a comparison between Bulgaria and neighboring countries has been made. The analysis assumes that sustainable development is development that, while satisfying the needs and expectations of the current generation, provides such opportunities for future generations.

Table 2. Where is Bulgaria?

Country/ Indicator for 2024	Austria	Denmark	France	Germany	Italy	Greece	Bulgaria	Romania	Hungary
Population, million	9,159	5,961	68,467	83,456	58,971	10,401	6,445	19,067	9,585
GDP, billion euros at current prices for 2024	494,088	392,401	2 919,89	4 328,970	2 199,620	236,736	104,767	353,633	206,040
GDP per capita, euros/capita	53 946	65 828	42 647	51 781	37 300	22 761	16 255	18 547	21 496
Primary energy consumption, million toe	29,3	15,5	211,0	232,0	131,3	21,0	16,6	29,6	22,2
Primary energy consumption per capita, toe/capita	3,20	2,60	3,08	2,78	2,23	2,02	2,58	1,55	2,32
Dependence on fuel and energy imports, %	53,322	38,229	40,060	66,802	73,854	77,714	41,936 65,673**	30,356	48,997
Efficiency of the energy balance, KEP/PEP, %	82,9	85,2	61,8	79,8	83	78,6	59,6	79,1	76,1
Energy intensity, kg.e./1000 euros	73,86	57,85	84,79	65,17	61,85	83,81	101,51	51,73	83,83
Ratio "energy intensity of Bulgaria" / "energy intensity of a country"	1,37	1,75	1,19	1,56	1,64	1,21	1,00	1,96	1,21
Gross electricity production, GWh	82 407	33 733*	570 713	511 881*	264 716*	49 917*	38 535	57 983*	35 546*
Gross electricity production per capita, kWh/capita	8 997	5 659	8 336	6 133	4 489	4 799	5 979	3 041	3 709
Electricity intensity, GWh/million euro	0,018	0,014	0,029	0,001	0,002	0,020	0,057	0,008	0,018
Ratio "Electricity intensity of Bulgaria" / "Electricity intensity of a country"	3,167	4,071	1,965	57	28,5	2,85	1	7,135	3,17
Share of combined heat and power generation in total electricity production, %	5,13	6,11*	1,56	5,63*	13,22*	5,44*	1,63	2,52*	2,27*
Share of natural gas in primary energy consumption, %	16,95	8,51	12,88	24,89	35,03	21,01	14,32	26,91	31,87
CO ₂ emissions, t/capital	6,213	4,373	4,085	7,115	5,310	4,998	5,353	3,559	4,209

Source: Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/home?>; <https://ourworldindata.org/grapher/gas-share-energy?tab=table>

*According to the latest available data for 2023.

** In 2024, according to Eurostat data, the country's energy dependence on fuels and energy is 41.936% Energy imports dependency (https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_id/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_ind), which is significantly lower than the average for EU member states. This is due to the methodology adopted by Eurostat, according to which nuclear energy is reported as a domestic energy source. Using the methodology for calculating energy dependence Energy imports dependency (https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/nrg_ind_id_esmsip2.htm) and reporting nuclear energy as an import Total energy balance (<https://www.nsi.bg/index.php/statistical-data/77/281>), the country's real energy dependence on fuels and energy for 2024 is 65.673%.

The results of the analysis show that Bulgaria is lagging behind by dozens of years in basic energy-economic indicators for sustainable development. Implementing the EU energy policy, along with the path it must take in its economic development, Bulgaria should also focus its efforts on several interrelated national goals and problem areas: **security of the functioning and development of energy; limiting the impact on the climate and clean energy; increasing energy efficiency; efficiency of the energy balance; resource and technological optimization and innovation in energy; development of the European energy market and liberalization of internal energy markets; resolving the institutional problems of energy management, analyzed in detail in Chapter 1 of the dissertation.**

Chapter II. Requirements for the selection of energy scenarios. Criteria for evaluating scenarios for the development of the national energy system

II.1. Importance of scenario planning

Developing long-term energy scenarios is the best way to combine demographic, economic, social and technological knowledge with an understanding of ecological systems and their associated issues. Scenarios serve as a tool for identifying changes and for analyzing the interrelationships between different perspectives and options. They allow for structured debates among stakeholders and institutions to explore alternative energy transition pathways and their implications.

II.2. Scenario classification

Scenarios vary considerably in the way they are developed and can take many forms. They can vary in geographical scope, sectoral scope, time horizon and on the basis of the models or expert assessments used. Scenarios differ mainly according to the declared purpose of their development. Scenarios for the development of energy systems vary in scope, methodology and objectives and there is still no universal typology that covers all approaches. Most often they are classified according to the main questions they answer – what will happen, what could happen and how a certain goal can be achieved. In this regard, three main types of scenarios are distinguished: predictive, research and normative. Predictive scenarios analyze the likely future, research scenarios consider possible options under different assumptions, and normative scenarios define paths to achieve specific goals, such as decarbonization of the energy sector. Scenarios can be qualitative, based on narratives and expert assessments, or quantitative, using models and numerical analyses, with each approach having its own advantages and limitations.

II.3. Requirements for the selection of energy scenarios

The selection of energy scenarios is a critical process in energy system planning, policy formulation and climate change mitigation strategies. As energy systems are influenced by multiple dynamic factors, including technological advances, market fluctuations, regulatory frameworks and geopolitical changes, it is essential to have clear guidelines for the selection of scenarios to predict the future of energy. This chapter outlines five key requirements for the selection of energy scenarios: *clarity of assumptions, comprehensive data and correspondingly appropriate modelling approaches, stakeholder engagement, adaptability to uncertainty and alignment with policy objectives*. These requirements ensure that the selected scenarios are credible, relevant and capable of guiding strategic decisions in energy planning.

II.4. Criteria for Evaluation of Scenarios for the development of the national energy system

Defining assessment criteria is the first step in sustainable development, design and monitoring. Criteria are tools for communicating energy issues related to sustainable development

and for promoting institutional dialogue. They should reflect the integrity of the system as well as the interaction of its subsystems; otherwise, they do not correspond to the complexity of the issues related to the sustainability of the different systems. The criteria used for assessing energy supply systems in the literature are mainly divided into four aspects:

- ✓ *Technical criteria.* Used to assess the availability and adequacy of the institutional framework for maintaining an efficient energy system.
- ✓ *Economic criteria.* Used to assess energy production and consumption patterns and the quality of energy services.
- ✓ *Environmental criteria.* Used to assess the impact of energy systems on the environment, positive or negative trends in land, water and air quality.
- ✓ *Social criteria.* Used to assess the impact of energy systems on human well-being. The availability of energy services has an impact on poverty, job opportunities, education, community and cultural development, demographic transition, indoor pollution and health.

The priorities or interests of different stakeholders can be taken into account by selecting the specific criteria from each group to be included in the assessment. For example, lifetime, investment costs, operation and maintenance costs may be the most important factors for investors. Meanwhile, carbon dioxide emissions, land use and water consumption are the most important issues for governments, while job creation and safety are the biggest concerns for local communities. This chapter of the dissertation presents a detailed list and comprehensive explanations of the importance of the criteria for assessing energy systems, taking into account all the perspectives of key stakeholders.

Chapter III. Modeling scenarios for the development of the national energy system

This chapter of the dissertation presents a detailed description of the identified options (alternatives) for the development of the energy system. The alternatives (scenarios) have been developed with the aim of being representative, i.e. starting from the current state of the national energy system to foresee the significant possible directions for development that could be implemented depending on existing and future combinations of factors: external (geostrategic and commercial interests of world powers and corporations) and internal (political decisions and interests of national players). Comparing the scenarios in this way allows for the selection of the most desirable of them and its inclusion in a national energy strategy. Possible deviations in actual development are reflected and specified in the shorter-term plans. This chapter presents the actually possible scenarios for the development of the national energy system, developed in the LEAP model environment and evaluated according to reasonably selected criteria. For the purposes of the dissertation, the following main and researchable scenarios have been defined: Long-term transition scenario (LTS), Scenario with additional policies and measures (WAM), Scenario with strong utilization of photovoltaic (SUP) and Scenario using dispersed

(decentralized) production capacities (DPC).

Chapter IV. Approaches for multi-criteria analysis of energy system development scenarios

Multi-criteria analysis approaches (MCAA) have emerged as valuable tools to support the energy system development planning process, providing a structured decision-making framework that takes into account a number of factors and perspectives. This chapter of the dissertation presents an overview of the importance and classification of MCAA methods, as well as the types and main steps of the basic MCAA procedure. It also examines how MCAA approaches can be used to assess energy development scenarios, highlighting the benefits of long-term energy planning and multi-criteria decision-making. By reflecting external uncertainties and applying different evaluation criteria, MCAA techniques can enrich the decision-making process, providing valuable information on the best way forward in energy system development.

IV.1. Description of the multi-criteria analysis approach

Multi-criteria analysis (MCA) is a set of methods and tools designed to formally incorporate multiple objectives and criteria in the analysis and evaluation of alternatives. Its main advantage is the ability to simultaneously take into account technical, economic, environmental and social aspects, which makes it widely applicable in solving complex tasks in various fields, including energy planning. Regardless of the variety of methods used, most approaches follow a common sequence of steps: **Option definition (alternative)**: a proposed alternative course of action to address a perceived problem; **Goal definition**: a specific goal against which each proposed alternative is evaluated; **Criterion selection**: a measurable factor that determines the effectiveness of the alternative in relation to a given goal, allowing for the measurement of the extent to which an alternative meets this goal; **Performance assessment**: a numerical representation of the effectiveness of a given option in relation to a specific goal or criterion. This assessment is determined on a given scale (for example, the range of scales that can be used for measurement can vary from 0 to 1, from 1 to 100, or from -5 to +5). **Determining the weight of a given criterion** – a criterion that determines the level of importance of a given objective and the corresponding criterion relative to the other objectives and criteria considered. The complete process of multi-criteria analysis usually requires the inclusion of two additional steps. The sixth step is to **combine the weight and score** of each alternative to obtain an overall score. The final step of MCA is to perform a sensitivity analysis of the results to changes in scores or weights.

Due to its flexibility and the ability to adapt to specific tasks, MCA is established as one of the most widely used approaches to support the decision-making process.

IV.2. Methods for multi-criteria analysis

The literature review shows the widespread application of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods in evaluating and selecting alternatives by simultaneously considering quantitative and qualitative indicators in order to determine the most appropriate solution, strategy or policy. These methods are applied in a wide range of fields, including energy, transport, water

resources management, environment, economics and public management. The methods described include: Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE), Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE), Weighted Product Model (WPM), Weighted Sum Model (WSM), Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART), Data Envelopment Analysis (DEA), Simulated Uncertainty Range Evaluations (SURE), Preference Order Technique by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS), Trade-Off Programming, and Multi Attribute Utility Theory (M-MAUT), etc.

The different methods are characterized by specific procedures for evaluation, determination of weights of criteria and ranking of alternatives, which allows choosing an appropriate approach according to the specific research problem. Depending on the way of processing and evaluating the information, the methods are divided into formal and simplified approaches (Figure 16). Formal methods use rigorous mathematical procedures, algorithms for comparing and ranking alternatives and usually require computer assistance in their implementation. Despite their higher complexity, they provide a more structured and analytical approach to decision-making. Due to its flexibility and ability to integrate different criteria, MCDA has established itself as an effective tool for analyzing complex systems, including in the evaluation and comparison of energy scenarios.

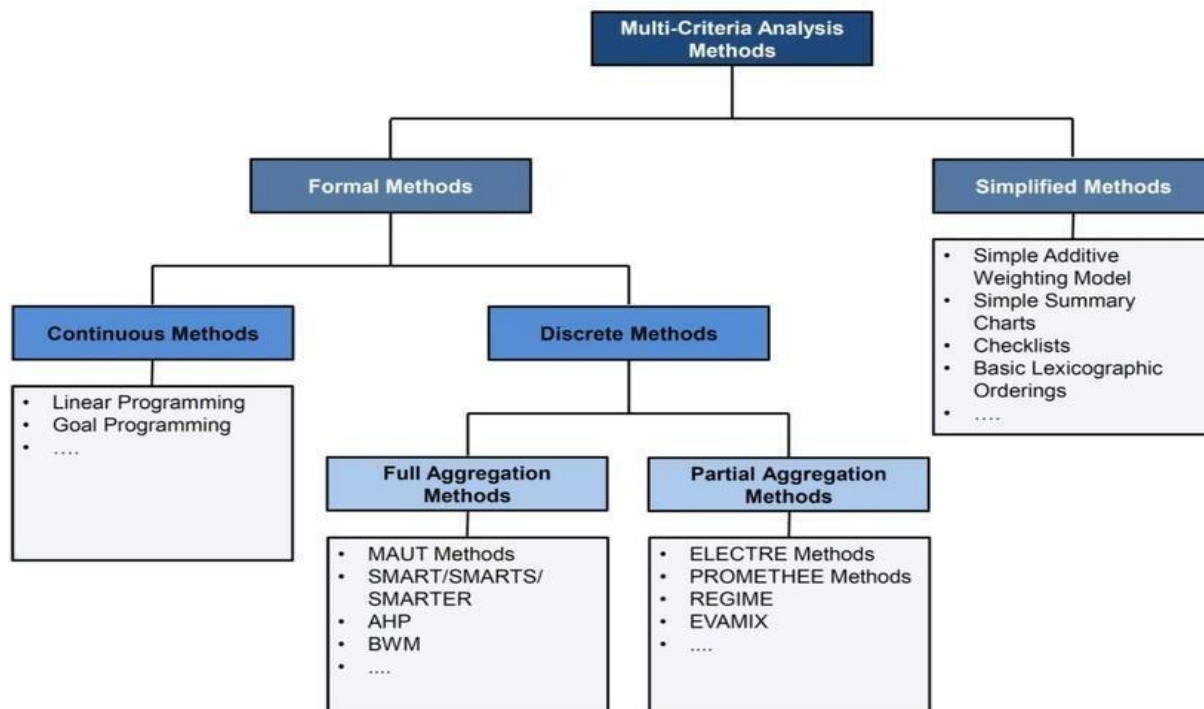


Figure 16. Classification of multi-criteria analysis methods

Chapter V. Multi-criteria analysis of scenarios for the development of the national energy system Figure 16. Classification of multi-criteria analysis methods

V.1. Introduction

The aim of this chapter of the dissertation is to present and compare quantitative assessments of some of these possible criteria for evaluating energy development scenarios, applying three widely used multi-criteria methods: Multiple Attribute Utility Theory (MAUT), Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE II).

V.2. Selection of criteria for quantitative assessment

The purpose of this section of the dissertation is to present the determined quantitative values of the criteria (sub-criteria and alternatives) for evaluating the energy development scenario, which were obtained as a result of energy planning through LEAP for each relevant scenario (Table 26).

Table 26. Values of the criteria and sub-criteria for the relevant alternatives (modeled using LEAP energy scenarios)

Criteria for Evaluation of Scenarios				Alternatives			
Criteria	Sub-Criteria	Units	Symbol	WAM Scenario	SUP Scenario	LTS Scenario	DPC Scenario
Social	GDP	euro per capita	SC 1	15 553	33 707	15 465	15 133
	Population	million people	SC 2	6	8,9	5.4	5.65
	Human development index	from 0 to 1	SC 3	0.894	0.935	0.935	0.915
Economic	Final energy consumption,	thousands t.o.e.	SC 4	10 667	6 992	4 089	9120
	Gross electricity production	thousands t.o.e.	SC 5	4 362	5 192	4558	4 660
	Primary energy consumption	thousands t.o.e.	SC 6	17 561	9 965	8747	13710
	Energy intensity,	t.o.e./1000 euro	SC 7	17.56	9.97	8.75	13.71
	Energy balance efficiency	%	SC 8	61	70	47	67
	Import dependency	%	SC 9	39	0	0	35.19
	Share of energy from renewable sources	%	SC 10	33	100	100	42
Ecological	CO ₂ emissions	million tones	SC 11	10.79	0	-4.65	2.5

V.3. Multi-criteria evaluation of the different scenarios studied

The purpose of this section of the dissertation is to present the application of the selected multi-criteria decision-making (MCDM) methods in the comparative assessment of the four energy scenarios modeled using LEAP. The section describes the sequence of the procedures

(steps) performed, the criteria and sub-criteria used for assessment, as well as the results obtained from the application of the individual methods. Based on the multi-criteria assessment performed, the results of the different scenarios are analyzed and compared in order to determine the most appropriate one among them in terms of the future development of the energy system.

The section contributes both to the identification of the most appropriate development scenario and to the assessment of the applicability of the different multi-criteria methods in the processes of energy planning and decision-making.

A. Multi-criteria evaluation through Analytical Hierarchy Process (AHP)

This method is structured around a hierarchical tree system that includes goals (decision-making), criteria, sub-criteria and alternatives. The AHP method includes several important stages (steps):

1. Organizing the components of the decision-making problem in question into a hierarchy (Figure 3):
 - a) Determining the main decision-making goal to be achieved;
 - b) Defining the criteria and sub-criteria on which the decision is based;
 - c) Identifying the alternatives.
2. Creating a pairwise comparison matrix with the relative importance of the different criteria (sub-criteria) and alternatives in relation to the decision goal, using the Saati basic scale. The diagonal elements of the matrix are 1. When the value of the element (i, j) is greater than 1, then the factor (criterion) in row i is more significant than the factor in column j, otherwise the factor in column j is more significant than the one in row i. When one criterion J is less important than another i, then the element (j, i) of the matrix is the reciprocal of the element (i, j), i.e. we have ratios from 1 ("equally important/unimportant") to 1/9 ("extremely unimportant").

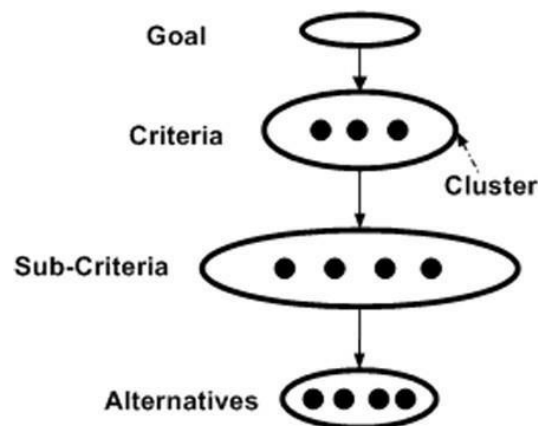


Figure 17. Hierarchical structure of AHP

3. Normalizing a pairwise comparison matrix. The normalized pairwise comparison matrix is calculated as: each element of the column is divided by the sum of all elements in the column.
4. Calculating criterion weights. The criterion weights are calculated by averaging all elements in a row and dividing the resulting number by the number of criteria.
5. Estimating consistency. Consistency involves a judgment by the decision maker regarding pairwise comparisons. The consistency ratio (CR), which measures the consistency of the result, is calculated by dividing the Consistency Index (CI) by the Random Consistency Index (RI).

$$CR = CI / RI < 10 \%,$$

where the Consistency Index (CI) of the pairwise comparison matrix is calculated as:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1},$$

and $\lambda_{\max}$ is the maximum eigenvalue, and n is the size of the pairwise comparison matrix.

6. Determining the comprehensive assessment of each scenario

The comprehensive assessment of the scenarios is obtained by applying the AHP method to the hierarchically structured criteria and sub-criteria, followed by determining the weighting coefficients, checking the consistency and forming the final ranking of the scenarios. The data from the obtained assessment are presented in next table:

Criteria	Sub-Criteria	Alternatives			
		WAM Scenario	LTS Scenario	SUP Scenario	DPC Scenario
Social	GDP	0.121	0.200	0.121	0.121
	Population				
	Human development index				
Economic	Final energy consumption,	-0.093	-0.028	-0.115	-0.115
	Gross electricity production				
	Primary energy consumption				
	Energy intensity,				
	Energy balance efficiency				
	Import dependency				
	Share of energy from renewable sources				
Ecological	CO ₂ emissions	-0.600	0.000	0.259	-0.139
Overall Rating		-0.573	0.172	0.264	-0.133
Ranking		4	2	1	3

The results of the multi-criteria assessment show a clear distinction between the scenarios considered. The **SUP Scenario** receives the highest complex score (**0.264**) and is ranked first due to the best performance in the environmental criterion, which has a decisive influence on the final ranking. The **LTS Scenario** takes second place (**0.172**), distinguished by good social and economic indicators. The **DPC Scenario** ranks third (**-0.133**), and the **WAM Scenario** is last (**-0.573**). The

results obtained show that the environmental criterion is decisive for the final ranking, while the differences in the social and economic assessments are relatively small.

Based on the assessment performed using the AHP method, the **SUP Scenario** is determined as the most suitable alternative.

B. Multi-criteria evaluation using Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)

Multiple Attribute Utility Theory (MAUT) is a widely used tool for decision making when considering multiple criteria. In this decision making process, the determination of the overall evaluation of the alternative is obtained by considering the marginal contributions of each criterion to the evaluation of the alternatives. The MAUT method includes the following main steps:

- 1) Construction of the decision matrix.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{0j} & \dots & x_{0n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n},$$

- 2) Calculating a normalized decision matrix. In the normalization process, the values of all criteria are first transformed to satisfy the requirements that the best and maximum possible value is 1 and the worst and minimum possible value is 0.

- a) For the criteria that need to be maximized

$$U_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

- b) For the criteria that need to be minimized

$$U_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

where x_{ij} is the corresponding element of the decision matrix, $U_{ij}(x_{ij})$ is an element of the normalized decision matrix, $\max(x_{ij})$ and $\min(x_{ij})$ represent the maximum and minimum element in the column vectors x_j , respectively.

Calculation of the utility of the alternative – aggregation of the assessment of the maximum benefits of the alternatives according to the different criteria.

$$U_j = \sum_{i=1}^{n_i} w_i * n_{ij}$$

where u_j is the utility of alternative j , n_{ij} is the normalized value of criterion i for alternative j , and w_i is the weight of the i^{th} criterion.

- 3) Determining the weighting coefficients of the normalized data matrix.
- 4) Selection of the best alternatives: They have the highest utility value U_j .

The results of the application of the AHP method for evaluating the scenarios considered are presented in the following table:

Alternative/ Sub-Criteria	SC 1	SC 2	SC 3	SC 4	SC 5	SC 6	SC 7	SC 8	SC 9	SC 10	SC 11	Priority amount	Rank
WAM Scenario	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.065	4
SUP Scenario	0.16	0.03	0.16	0.05	0.03	0.11	0.03	0.09	0.09	0.03	0.11	0.892	1
LTS Scenario	0.00	0.00	0.16	0.09	0.01	0.13	0.03	0.00	0.09	0.03	0.16	0.697	2
DPC Scenario	0.00	0.00	0.08	0.02	0.01	0.05	0.01	0.08	0.01	0.00	0.09	0.363	3

The results of the application of the MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) method show a clear distinction between the evaluated scenarios in terms of their overall utility. The final ranking is: **SUP Scenario** – first place with an overall score of **0.892**, followed by **LTS Scenario (0.697)**, **DPC Scenario (0.363)** and **WAM Scenario (0.065)**.

The **SUP Scenario** is the most suitable alternative, as it provides the highest overall utility and the best balance between the individual criteria. The differences between the scenarios are determined by the degree to which each alternative satisfies the set of set sub-criteria.

C. Multi-criteria evaluation with the PROMETHEE II method

The PROMETHEE II method usually includes the following main steps:

- 1) Constructing the decision matrix, defining the criteria ($j=1,\dots,k$) and the set of possible alternatives in the decision-making task;
- 2) Determining the weights w_j of the criteria:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

- 1) Normalization of the decision matrix
 - a) To evaluate the benefits of a given criterion, the following formula is used
$$R_{ij} = [(X_{ij}) - \min (X_{ij})]/[\max (X_{ij}) - \min (X_{ij})]$$
 - b) To estimate the costs of a given criterion, the following formula is used:
$$R_{ij} = [\max (X_{ij}) - (X_{ij})]/[\max (X_{ij}) - \min (X_{ij})],$$

where X_{ij} are the evaluation values obtained by decision makers $i = 1, 2, \dots, n$; and the number of criteria $j = 1, 2, \dots, k$.

- 2) Determination of the deviation by pairwise comparison

$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$, where $d_j(a,b)$ represents the difference between the evaluation of criterion a and criterion b.

3) of the general preference function

$$P_j(a,b) = F_j [d_j(a,b)] \text{ c } \forall x \in [-\infty, \infty], 0 \leq F(x) \leq 1,$$

where $P_j(a,b)$ represents the function of the differences between the scores of alternative a with respect to alternative b on each criterion. The value ranges from 0 to 1.

4) Determination of the index of multi-criteria ranking (outranking, preferring, surpassing).

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k [W_j * P_j(a,b)] / [\sum_{j=1}^k W_j]$$

where W_j is the weight, which represents the relative importance of criterion j

5) Calculation of the positive and negative outranking flow for each alternative

a) The following formula is used for the positive outranking flow:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

b) The following formula is used for the negative outranking flow:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

6) Calculation of the net outranking flow for each alternative

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j$$

The next table presents the results of applying the PROMETHEE II method to the studied energy scenarios and the resulting ranking of alternatives:

Alternatives	Positive flow	Negative flow	Net flow	Rank
WAM Scenario	0.039	0.543	-0.504	4
LTS Scenario	0.561	0.081	0.480	1
SUP Scenario	0.327	0.201	0.127	2
DPC Scenario	0.184	0.286	-0.102	3

The results of the PROMETHEE II evaluation, based on the calculated net flow values, show a clear distinction between the scenarios considered. The net flow represents the balance between positive and negative preferences and determines the extent to which each alternative outperforms or is outperformed by the others.

Based on the final calculation using the PROMETHEE II method on the marginal utility value, it was determined that the objectively best/most suitable alternative according to the evaluation results is an alternative – **Scenario SUP**. The alternative was chosen because it has the

highest utility value, namely **0.480**. Alternatives **Scenario LTS (0.127)**, **Scenario DPC (-0.102)** and **Scenario WAM (-0.504)** follow in sequence.

The conclusion from this section is that the different methods for multi-criteria scenario evaluation give the same or very close results if the initial assessment of the importance of the criteria (weights) is the same. Therefore, it is not crucial which of these methods is used. What is really important for the energy planning procedure is the correct choice of criteria for evaluating scenarios (based on environmental, social and economic objectives) and the correct determination of their relative importance. However, in today's complex world, it is not permissible to make decisions based only on one or two criteria or, as is the case with our national energy system, based on the desire to please some major market players. It is mandatory to apply multi-criteria assessment methods.

Contributions of the dissertation

1. Scientific and applied contributions

- 1) As a result of an analysis of specialized literature and strategic documents in the field of energy planning, the need for the implementation of a national strategic energy planning process has been justified.
- 2) Methods/approaches and criteria for assessing energy scenarios have been systematized and adapted, allowing for a comprehensive consideration of the impacts on economic development, energy security, social welfare and environmental protection in long-term energy planning.
- 3) Alternative scenarios for the development of the national energy system, modeled through the environment (LEAP), have been developed and formalized.
- 4) A quantitative estimation and comparative analysis of alternative scenarios for the development of the national energy system has been carried out by applying the AHP, MAUT and PROMETHEE II methods. This allows for an objective ranking/ordering of the considered options and supports the choice of strategic decisions in the energy sector.

2. Applied contributions

- 1) A structured framework for the assessment and comparison of alternative scenarios for the development of the energy sector has been created, which can be used in the development, updating and justification of national energy strategies, plans and programs. An approach has been developed that creates an opportunity for the integration of expert assessments and preferences of stakeholders in determining the relative importance of selected criteria, which increases the transparency and validity of decisions in the field of energy planning

- 2) Validated methods for multi-criteria analysis (AHP, MAUT and PROMETHEE II) have also been applied as a toolkit for the real assessment of energy scenarios, which can assist institutions and experts in making justified and informed decisions.

List of publications on the dissertation

- [1] Prof. DSc, Plamen Tsvetanov, Eng. Kristina Hadzhiyska, EU Energy Policy and Bulgaria's Policy, Association of Bulgarian Energy Agencies, 2018
- [2] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Criteria for Evaluation of Scenarios for National Energy System Development," *2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021174.
- [3] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Multi-Criteria Analysis Approaches for Energy System Development Scenario — Review," *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-9, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202557.
- [4] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "Multicriterial Quantitative Estimations for Evaluation of Scenarios for Development of the Bulgarian National Energy System," *2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 2024, pp. 1-8, doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637808.
- [5] K. Hadzhiyska and D. Stoilov, "New Goals: Updates of National Energy Planning Scenarios," *2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794851.

MSc eng. Kristina Yurieva Hadzhiyska

Assessment of scenarios for the development of the national energy system

SUMMARY

The present PhD thesis is dedicated to the investigation of long-term energy planning processes and the development of a methodological framework for modelling and evaluating scenarios for the future development of the national energy system. The relevance of the research is determined by the profound transformation of energy systems worldwide, driven by technological progress, economic changes, geopolitical factors, increasing requirements for energy security, and the transition towards a low-carbon economy. The need for scientifically based approaches supporting strategic decision-making in the energy sector defines the importance of developing reliable methods for analyzing and comparing alternative pathways for energy system development.

The thesis presents a comprehensive study covering the main stages of strategic energy planning. Initially, an analysis of European and national energy policies is performed, focusing on the evolution of the Energy Union framework, the objectives of European energy and climate policies, and the development of Bulgaria's energy policy after its accession to the European Union. International experience and good practices in energy planning are examined, with emphasis on approaches applied in leading countries and their potential adaptation to national conditions.

A detailed review of mathematical models and analytical approaches used by international institutions, research centres, and specialized organizations for energy system modelling, forecasting, optimization, and scenario analysis is provided. Based on this analysis, the main factors influencing the development of national energy systems are identified, including technological, economic, environmental, regulatory, social, and geopolitical aspects. The thesis emphasizes that energy scenarios should not be considered as predictions of the future but as structured representations of possible development pathways under different assumptions and constraints.

Four alternative scenarios for the development of the national energy system are formulated and modelled using the Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP): Long-Term Transition Scenario (LTS), With Additional Measures Scenario (WAM), Scenario with Enhanced Renewable Energy Sources Development (SUP), and Scenario Based on Decentralized Production Capacities (DPC). The evaluation of the developed scenarios is performed using three widely applied multi-criteria decision-making methods: Analytic Hierarchy Process (AHP),

Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE II). Eleven evaluation indicators are considered and grouped into three main categories: social, economic, and environmental criteria. The social criteria include gross domestic product, population, and human development index; the economic criteria include final energy consumption, gross electricity generation, gross inland energy consumption, energy intensity, energy efficiency, energy import dependency, and share of renewable energy sources; while the environmental criterion is represented by carbon dioxide emissions.

The results obtained from the multi-criteria assessment provide a comparative evaluation of the investigated scenarios and identify the most suitable alternatives according to the selected criteria. The results obtained from the multi-criteria assessment provide a comparative assessment of the scenarios studied and identify the most suitable alternatives according to the selected criteria. Different methods for multi-criteria scenario assessment give the same or very close results if the initial assessment of the importance of the criteria (weights) is the same. Therefore, it is not crucial which of these methods is used. What is really important for the energy planning procedure is the correct choice of the criteria for evaluating the scenarios (based on environmental, social and economic objectives) and the correct determination of their relative importance.

The developed methodological framework contributes to improving the process of strategic energy planning by integrating scenario modelling, quantitative evaluation indicators, and multi-criteria decision analysis. The proposed approach can support policymakers, energy planners, and stakeholders in the formulation of more informed strategies aimed at achieving sustainable development, energy security, economic efficiency, and compliance with long-term European energy and climate objectives.