



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия



Национална научно-техническа конференция  
БЪЛГАРСКАТА ЕНЕРГЕТИКА - СЪСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВИ

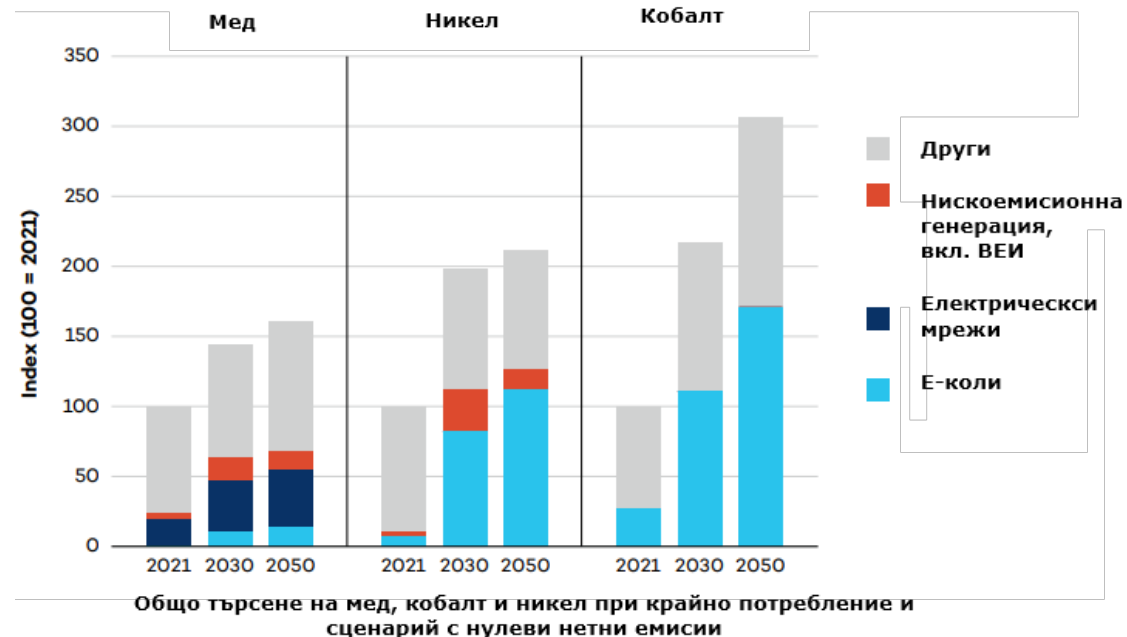
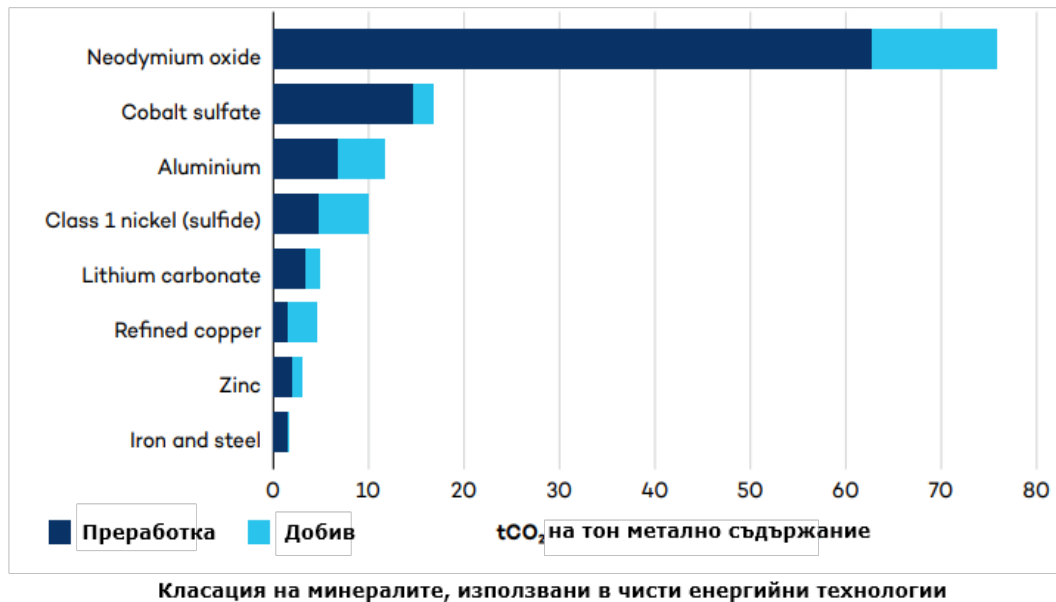


Инж. Димитър Куюмджиев  
Енергиен експерт

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

- Глобалното търсене на горива, минерали и метали е водено от стремежа за по-бързо реализиране на 4-та индустриална революция, технологичното развитие и, по-скоро, енергийния преход. Търсенето на критични минерали като литий, графит и кобалт може да се увеличи с до 500% до 2050 г., водено главно от разширяването на технологиите за чиста енергия и електрифицираните транспортни системи. Този бърз растеж на търсенето позиционира минната индустрия като стратегически фактор за енергийния преход, като същевременно засилва натиска върху производствения капацитет и ресурсната ефективност.
- Сектори като автомобилостроенето, аерокосмическата индустрия, технологиите за възобновяема енергия и нейното съхранение разчитат в голяма степен на широк спектър от метални и неметални ресурси. Това нарастващо търсене, съчетано с намаляващите ресурси и нарастващата сложност на добива, е довело до значително увеличение на потреблението на енергия в минната индустрия. Смята се, че секторът генерира между 1,9 и 5,1 гигатона CO<sub>2</sub> еквивалент (CO<sub>2</sub>e) емисии на парникови газове годишно, което представлява от 2% до 7% от глобалните емисии на парникови газове.
- Този натиск насърчава нарастващия интерес към стратегии за декарбонизация, базирани на оперативна оптимизация, електрификация и интегриране на възобновяеми енергийни източници, които все повече се считат за икономически жизнеспособни алтернативи на конвенционалните системи, базирани на изкопаеми горива.

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия



Една от ключовите причини за тази класация е, че технологиите, необходими за ускоряване на енергийния преход – по-специално технологиите за електрическа мобилност и възобновяема енергия – са значително по-интензивни по отношение на минералите от настоящите технологии, базирани на изкопаеми горива. Освен стоманата и алуминия, типичният електрически автомобил се нуждае от шест пъти повече минерални суровини от автомобил с двигател с вътрешно горене.

Темата на презентацията е структурирана около следните взаимосвързани теми:

1. Модели на потребление на енергия в минните операции, с диференциация по вид мина (открита или подземна), оперативни дейности (транспорт, вентилация, раздробяване) и характеристики на обекта (свързана към мрежата или извън мрежата).
2. Лостове за декарбонизация, включително мерки за оперативна ефективност, електрификация на оборудването, смяна на горива и стратегии за управление на енергията.
3. Интегриране на възобновяеми енергийни източници, като вятърна, слънчева и водноелектрическа енергия, като се отчита техническата осъществимост, икономическите ограничения и специфичните условия на обекта.
4. Решения за съхранение на енергия, подкрепящи интеграцията на възобновяема енергия, включително системи за съхранение на енергия от батерии, помпено-акумулаторни водноелектрически централи, проточни редокс батерии и водородни системи, с акцент върху тяхната пригодност за минни приложения.

**Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия**  
Моделите на потребление на енергия в минните операции

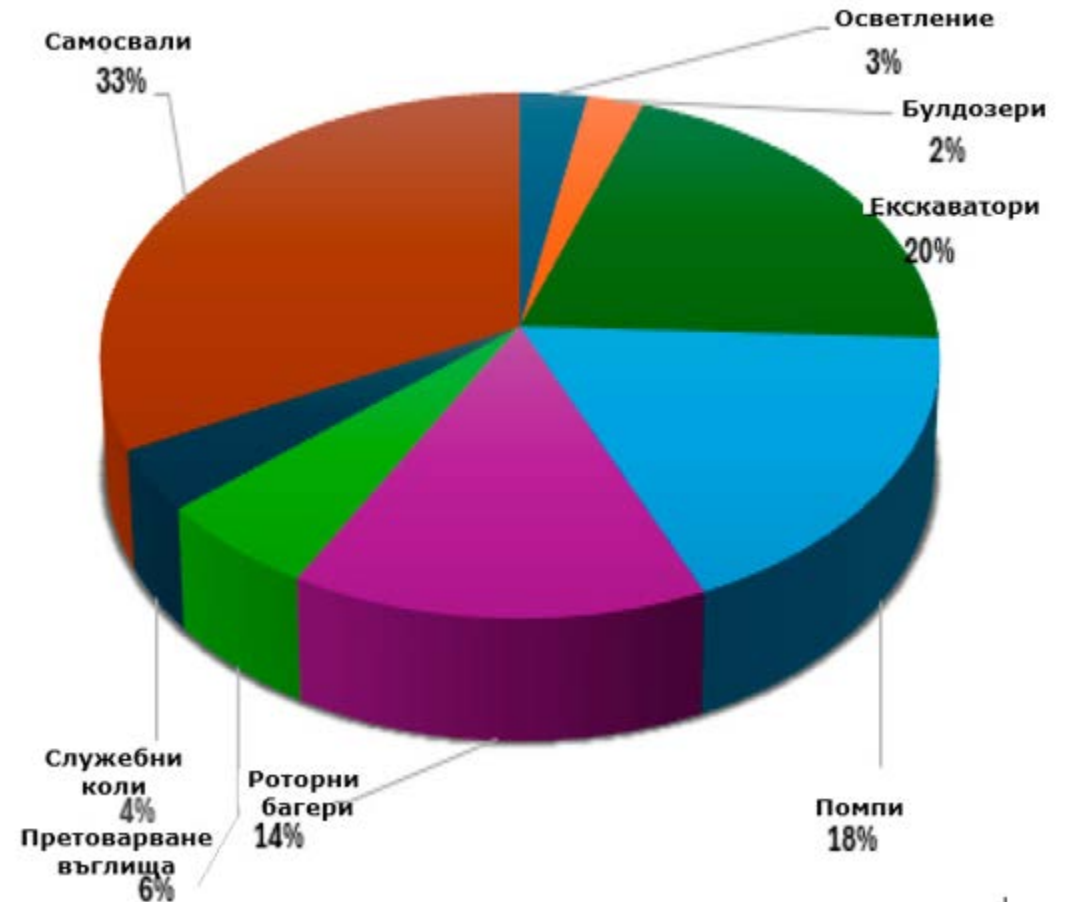
- Моделите на потребление на енергия в минните операции са силно повлияни от вида на мината, дълбочината и геометрията на рудното тяло и местоположението на обекта.



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

### Модели на потребление на енергия в минните операции

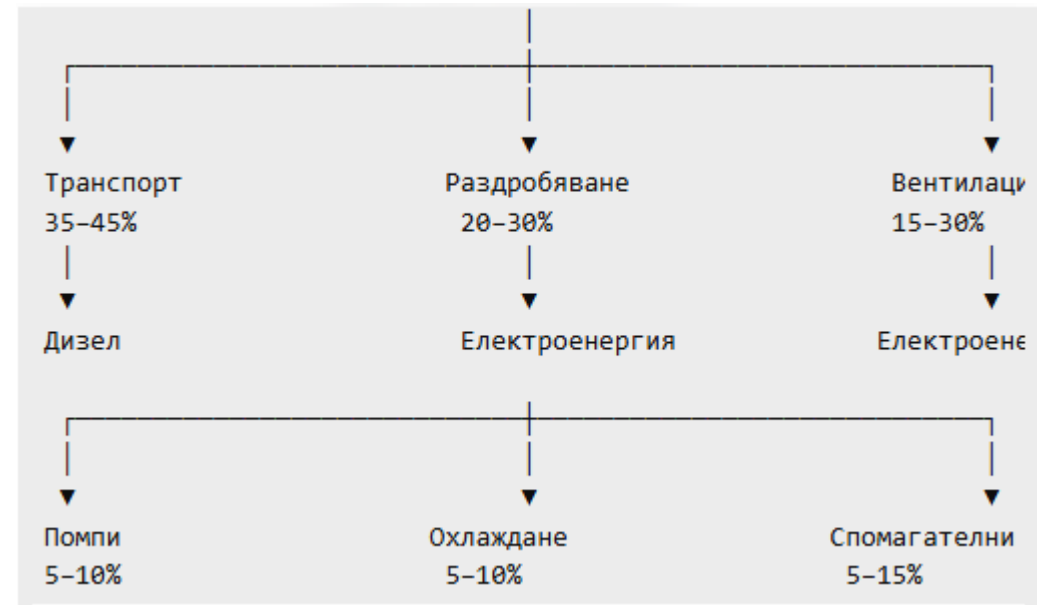
- Откритите мини разчитат в голяма степен на мащабни системи за обработка на материали, особено операции с роторни багери, булдозери, транспортъори за изнасяне на добива.
- В някои открити мини за изнасяне на добива се използват предимно самосвали, които се характеризират с висока консумация на дизел.
- Мобилното оборудване може да представлява значителен дял от общото потребление на енергия, като само дизелът представлява близо 40% от потреблението на енергия в някои открити мини.
- Установено е, че механичният изкоп генерира по-високи емисии и потребление на енергия, отколкото в подземните мини, главно поради продължителната работа на оборудването.



Пример за профил на потребление на енергия в открита въглищна мина в Индия, с обща вложена енергия от 160 MJ/t.

- Подземните мини, за разлика от откритите, са проектирани за достъп до дълбоки рудни тела чрез вертикални шахти и обширни мрежи от галерии и камери. Подземният добив е свързан с по-високи капиталови и оперативни разходи поради сложността на инфраструктурата и изискванията за безопасност.
- От енергийна гледна точка, подземните операции са особено взискателни, тъй като само вентилационните системи могат да представляват до 30% от общото потребление на енергия, в допълнение към значителната консумация на електроенергия за подземни помпени и охладителни системи.

## Sankey диаграма – енергийни потоци в минна операция

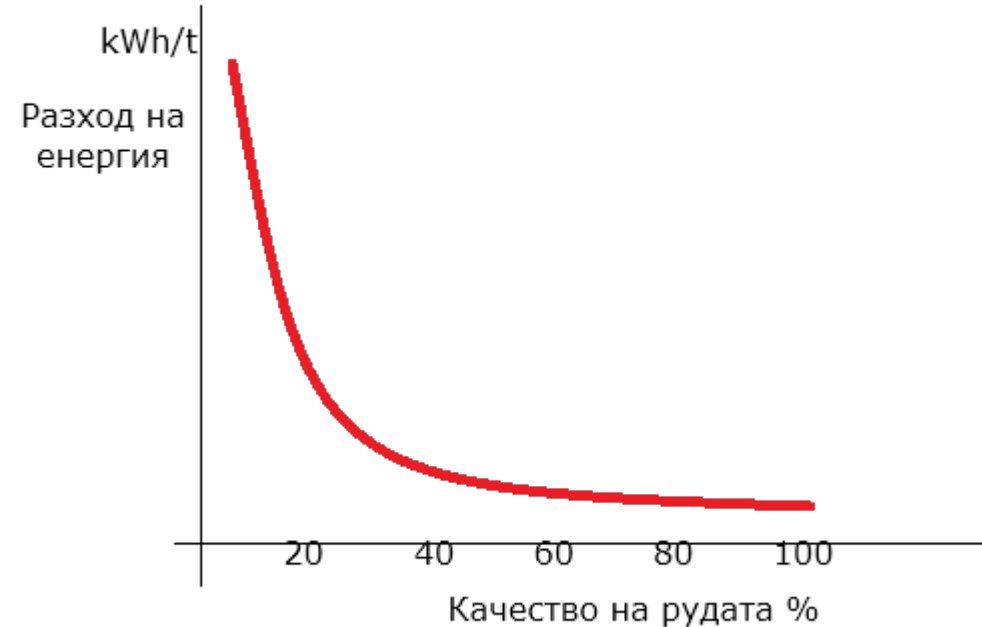


Най-голям потенциал за декарбонизация има при транспорта и електрозахранването

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

### Модели на потребление на енергия в минните операции

- Всъщност, с намаляването на качеството на рудата, е необходимо да се извлича, премества, транспортира и раздробява повече руда, за да се получи същото количество ценен минерал.
- Дълбочината на мината също е важен фактор; колкото по-дълбоко трябва да се извлече рудата, толкова по-висока е консумацията на енергия в процеса на добив.
- През последните години проучвания сочат увеличение на енергийната интензивност което означава, че влиянието на геоложките фактори и изчерпването на ресурсите е изпреварило технологичните подобрения. Подобна ситуация може да продължи, тъй като съществуват термодинамични и практически ограничения за енергийната ефективност на процесите.



Изчерпването на ресурсите увеличава енергийните разходи независимо от технологичния напредък.

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Лостове за декарбонизация, включително мерки за оперативна ефективност

Следователно, справянето с потреблението на енергия и декарбонизацията в минното дело е от съществено значение, за да се гарантира, че преходът към устойчиви енергийни системи се подкрепя от производствени практики, които са екологично и икономически устойчиви.

Няколко проучвания са изследвали възможностите за намаляване на потреблението на енергия в лентови конвейерни системи чрез използването на конвейерни ленти с ниско триене, честотни преобразуватели, системи за автоматизация и регенеративни конвейери. Само оптимизираното разпределение на натоварването може да намали потреблението на енергия с до 30%, в зависимост от условията на работа и характеристиките на потока от материали.

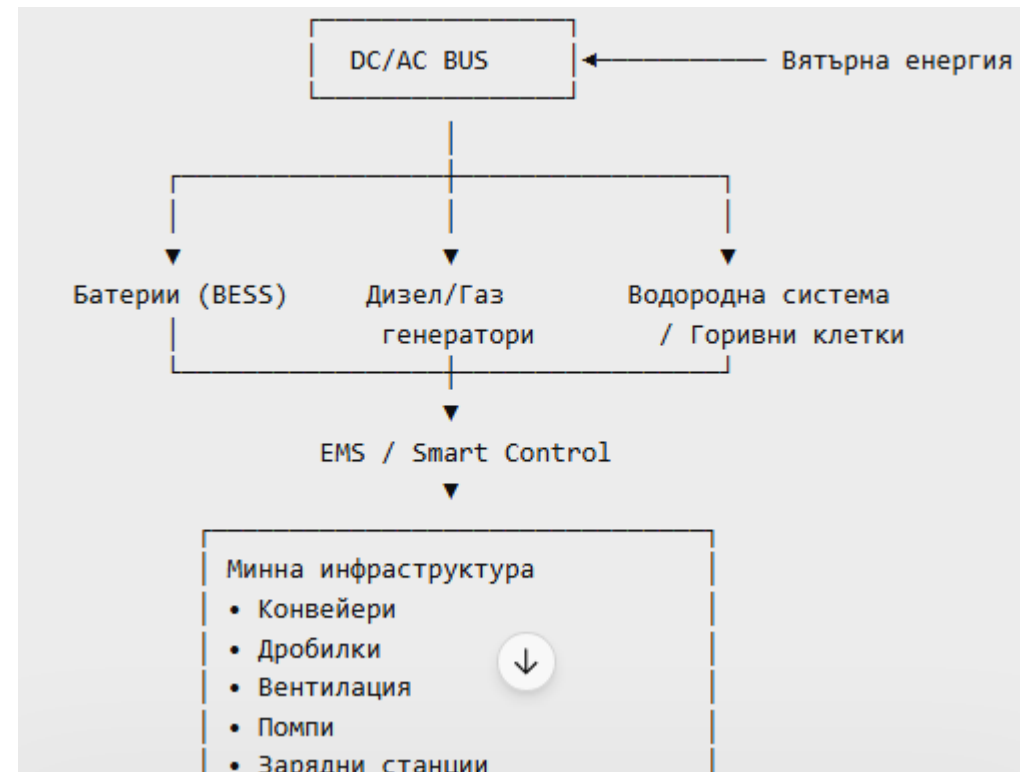


## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Лостове за декарбонизация, включително мерки за оперативна ефективност

Сериозно предизвикателство пред управлението на електрическата енергия в минната индустрия е уязвимостта на автоматизираните системи към прекъсвания на електрозахранването. Такива прекъсвания не само нарушават производството, но и увеличават оперативните разходи и могат да компрометират целостта и безопасността на оборудване и миньори.

Осигуряването на стабилно и надеждно електрозахранване включва усъвършенствана интеграция на съхранение и някои хибридни микромрежови архитектури в цялата мина. Чрез преглед на настоящите енергийни практики са идентифицирани стратегии, позволяващи нива на проникване на възобновяема енергия над 50% до 2050 г



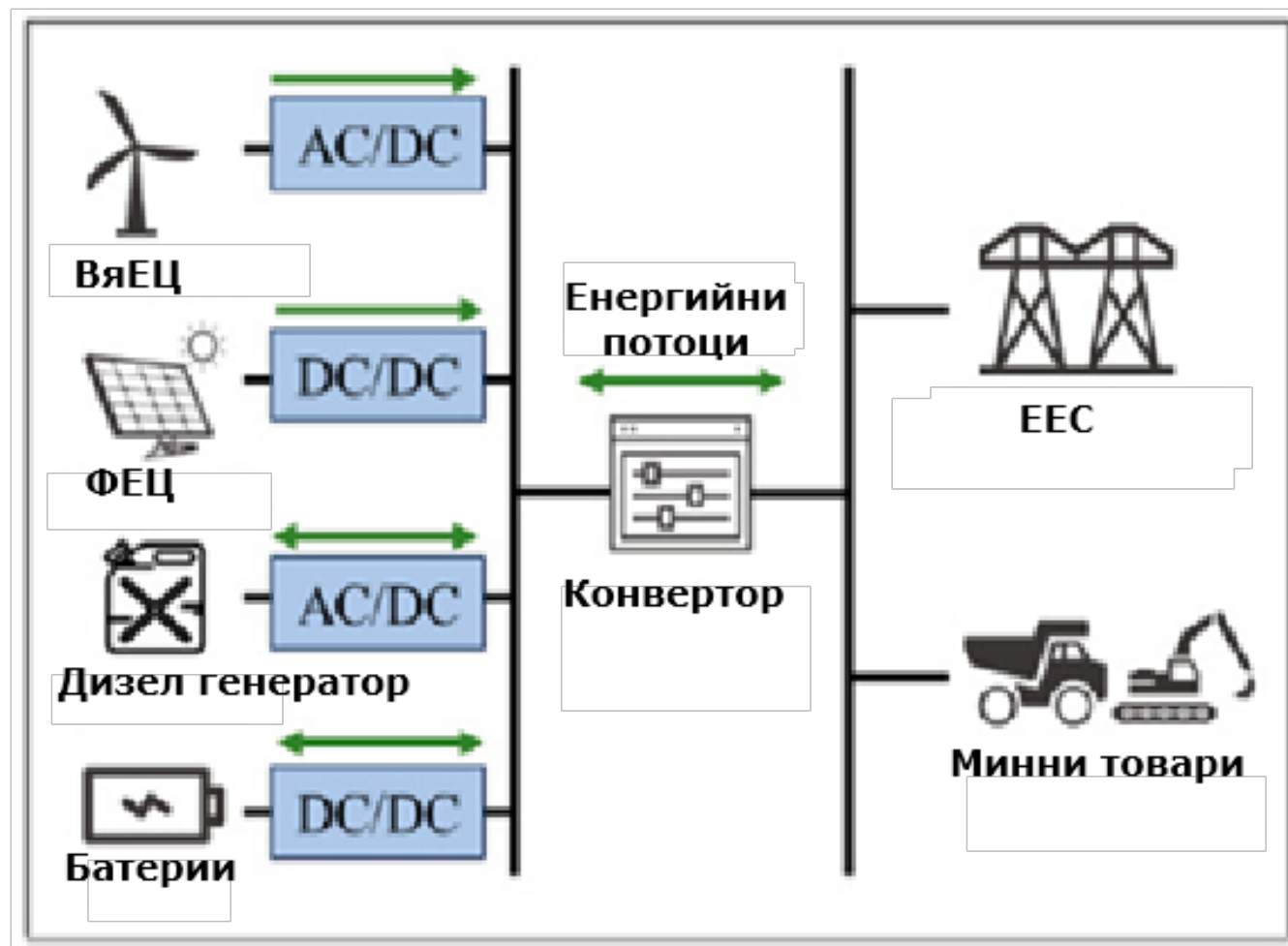
## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Лостове за декарбонизация, включително мерки за оперативна ефективност

На системно ниво хибридните микромрежи са се очертали като предпочитана конфигурация за минните обекти, комбинирайки производство на възобновяема енергия, конвенционално резервно съхранение на енергия, за да се гарантира надеждност и гъвкавост, илюстрирано с принципа на работа на хибридна микромрежа за минни операции.

Чрез подходящ дизайн на системата и приложени оптимизационни модели може значително да намалят емисиите на парникови газове, като същевременно се запази надеждността.

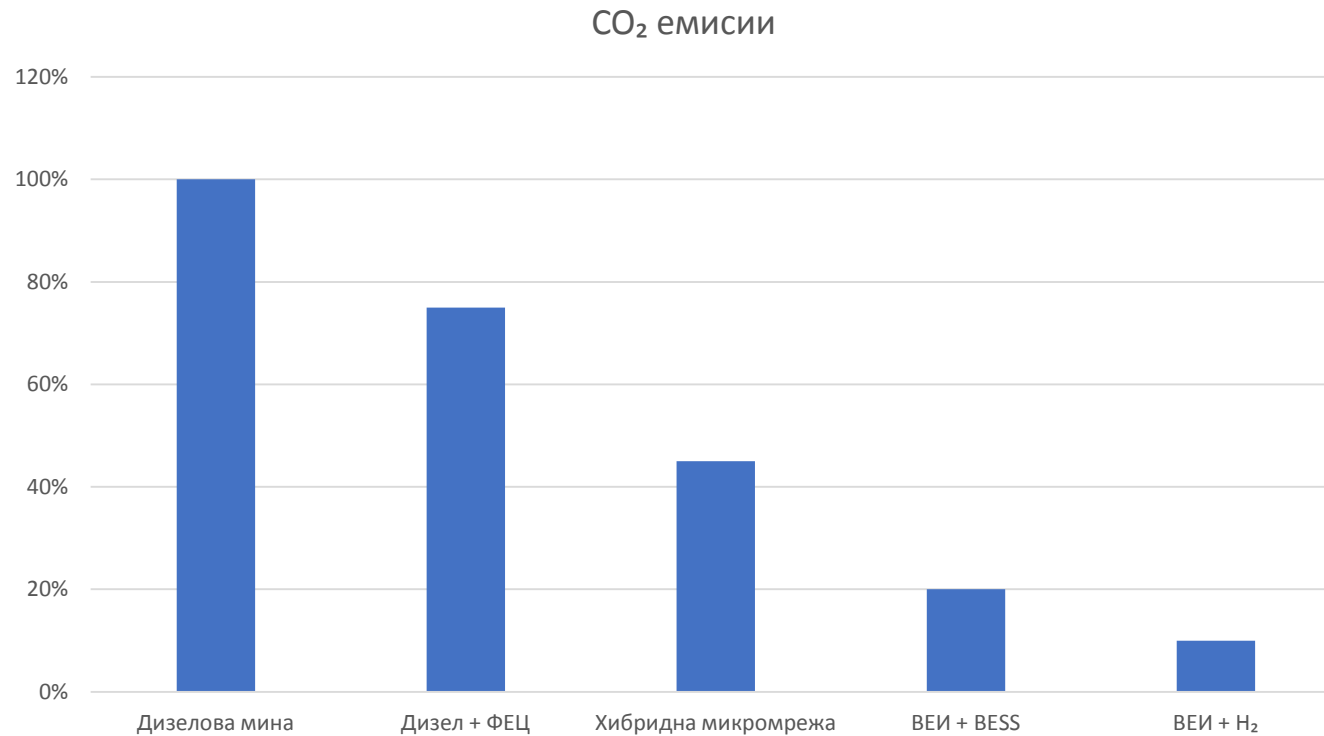
Изисква се свързване на системи за производство с технологии за съхранение на енергия, за да се изгладят колебанията и да се отговори на пиковото търсене.



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Лостове за декарбонизация, включително мерки за оперативна ефективност

### Сравнение на емисиите при различни енергийни конфигурации



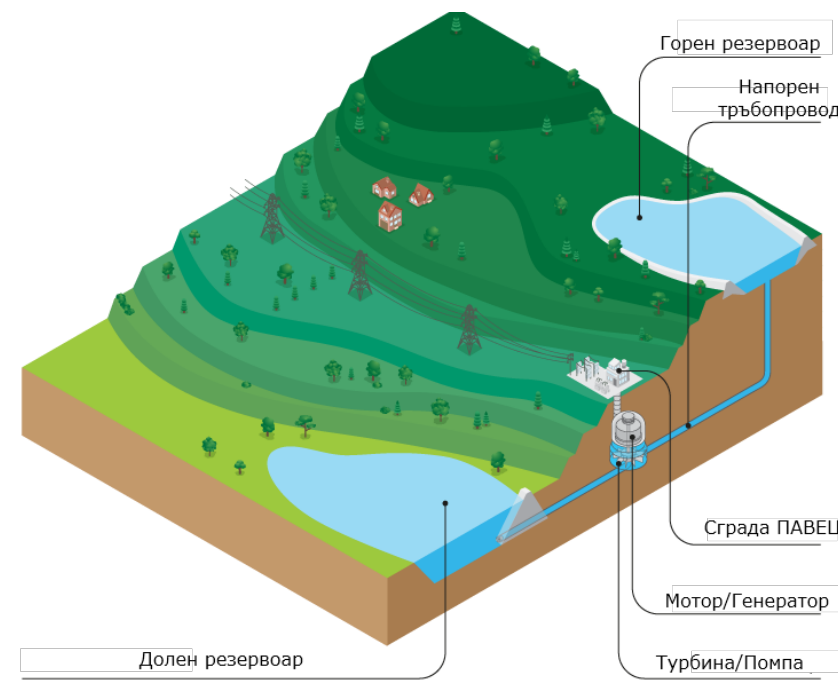
Извод: Хибридизацията е най-реалистичният краткосрочен преходен модел.

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Интегриране на възобновяеми енергийни източници,

Няколко решения за съхранение са особено подходящи за минни приложения, включително съхранение на енергия от помпено-акумулаторни водоелектрически централи (ПАВЕЦ), електрохимични акумулаторни батерии (АБ), проточни/редокс батерии и съхранение на водород.

От икономическа гледна точка, ПАВЕЦ остава най-рентабилната технология за съхранение на големи количества енергия през целия си жизнен цикъл. С експлоатационен живот, приближаващ 80 години, инвестициите в ПАВЕЦ обикновено се възстановяват многократно, като разходите се оценяват на четири до осем пъти по-ниски от алтернативните технологии за съхранение. Казуси в Германия и Белгия отчитат конкурентни инвестиционни разходи и периоди на възвръщаемост под 10 години.



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Интегриране на възобновяеми енергийни източници,

Трудно е да се сравняват различни видове съоръжения за съхранение на енергия (ССЕ).

Всяка технология за ССЕ има уникални силни страни и ограничения, които влияят върху нейната приложимост и пригодност за специфични приложения. Изборът на ССЕ се влияе от редица фактори и предвиденият случай на употреба, независимо дали за краткосрочно балансиране на мрежата или дългосрочно съхранение на енергия.

Интеграцията на ВЕИ предлага висок потенциал за смекчаване както в контекст извън мрежата, така и в контекст, свързан към мрежата, когато са налични достатъчно местни ресурси, но нейната ефективност зависи силно от съхранението и гъвкавостта на системата.

Решенията на базата на водород изглеждат по-подходящи като дългосрочни варианти за трудно електрифициращо се мобилно оборудване и отдалечени операции, но понастоящем те остават по-малко конкурентни по отношение на разходите и по-малко зрели от другите пътища.



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

### Решения за съхранение на енергия

Таблицата се фокусира върху ССЕ, които понастоящем са способни да осигуряват критичен капацитет за съхранение от поне 20 MW.

Тип ССЕ	Макс мощност (MW)	Разтоварване (h)	Макс бр. цикли	Енерг. Плътност (Wh/l)	Ефективност
ПАВЕЦ	~3000+	4-16 h	30-60 години	0.2-2	70-85%
Сгъстен въздух	~1000	2-30 h	20-40 години	2-6	40-70%
Разтопена сол	100-150	Няколко (h)	~30 години	70-210	80-90%
Li-ion АБ	1-100+	1 min-8 h	1000-10,000 цикли	200-400	85-95%
Pb-Zn АБ	1-100	1 min-8 h	6-40 години	50-80	80-90%
Редокс АБ	10-100+	Няколко (h)	12,000-14,000 цикли	20-70	60-85%
Водород	~100+	мин-седмици	5-30 години	~600 (at 700 bar)	25-45%
Супер маховик	1-20	Сек - Минути	20,000-100,000+цикли	20-80	70-95%

Що се отнася до рентабилността на мерките, енергийната ефективност е най-рентабилна (30-50%), следвана от възобновяемите енергийни източници (15-25%), след това електрификацията на оборудването (10-20%) и накрая зеления водород (5-15%) (дългосрочно).

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Решения за съхранение на енергия

Сравнение на технологии за съхранение на енергия в минната индустрия

Технология	Капацитет	време на разряд	CAPEX	Живот	Подходяща за
Li-ion батерии	Среден	Кратък	Висок	10–15 г.	Бърз баланс
Flow батерии	Среден	Среден	Среден	15–20 г.	Микрорежи
ПАВЕЦ	Много висок	Дълъг	Висок	60–80 г.	Масово съхранение
Водород	Много висок	Много дълъг	Много висок	20+ г.	Off-grid операции
CAES	Висок	Дълъг	Среден	30+ г.	Големи мощности

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Решения за съхранение на енергия

### ПРИМЕР

Използвайки софтуера HOMER - световен стандарт в моделирането на хибридни енергийни системи, изследователи са оценили система, включваща 50 MW фотоволтаична мощност, 15 MW горивни клетки, 600 батерии, 20,5 MW конвертори и 20 MW дизелови генератори. Резултатите им показват, че от общо годишно производство на електроенергия от 152,99 GWh, фотоволтаичното производство представлява 44%, горивните клетки - 40%, а дизеловите генератори - 14%. При допускане за цена на дизела от 0,80 щатски долара за литър и 30% намаление на разходите за фотоволтаични модули и горивни клетки, изравнената цена на енергията е била оценена на 0,25 щатски долара/kWh. Въпреки че подобни хибридни конфигурации демонстрират техническата осъществимост за намаляване на зависимостта от изкопаеми горива, те също така подчертават капиталоемкостта и сложността на системата, свързани с високия дял на нисковъглеродната енергия в минните приложения.

Държава	Мина	Връзка с ЕЕС	Тип Енергия	Мощност (MW)	Дял ВЕИ
Австралия	Agnew Gold Mine	Автономна	ФЕЦ-ВяЕЦ-Дизел-Газ-АБ	56	~ 50%
Австралия	Degrussa Copper Mine	Автономна	ФЕЦ-Дизел-АБ	10,6	~ 20%
Австралия	Granny Smith Gold Mine	Автономна	ФЕЦ-АБ	9,3	~ 21%
Австралия	Weipa Bauxite	Автономна	ФЕЦ-Дизел-АБ	6,7	~ 20%
Чили	El Tesoro Copper Mine	Свързана	ФЕЦ	10,5	Var
Чили	Collahuasi Copper Mine	Свързана	ФЕЦ	25	Var

## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

Решения за съхранение на енергия

През годините минната индустрия е изследвала много различни потенциални пътища за декарбонизация. Съвсем наскоро хибридизацията се появява като забележително решение в преодоляването на ефективен енергиен преход. Хибридите съчетават доказан двигател с вътрешно горене с мощностна батерия и регенеративно улавяне на енергия, чрез електрически мотор-генератори, интегрирани в задвижването. Резултатът е повече мощност, по-добра горивна ефективност и по-ниски емисии. Камион, използвайки хибридни възможности за работа над 2500 часа, постига 15% до 30% намаление на разхода на гориво и следователно на въглеродните емисии.

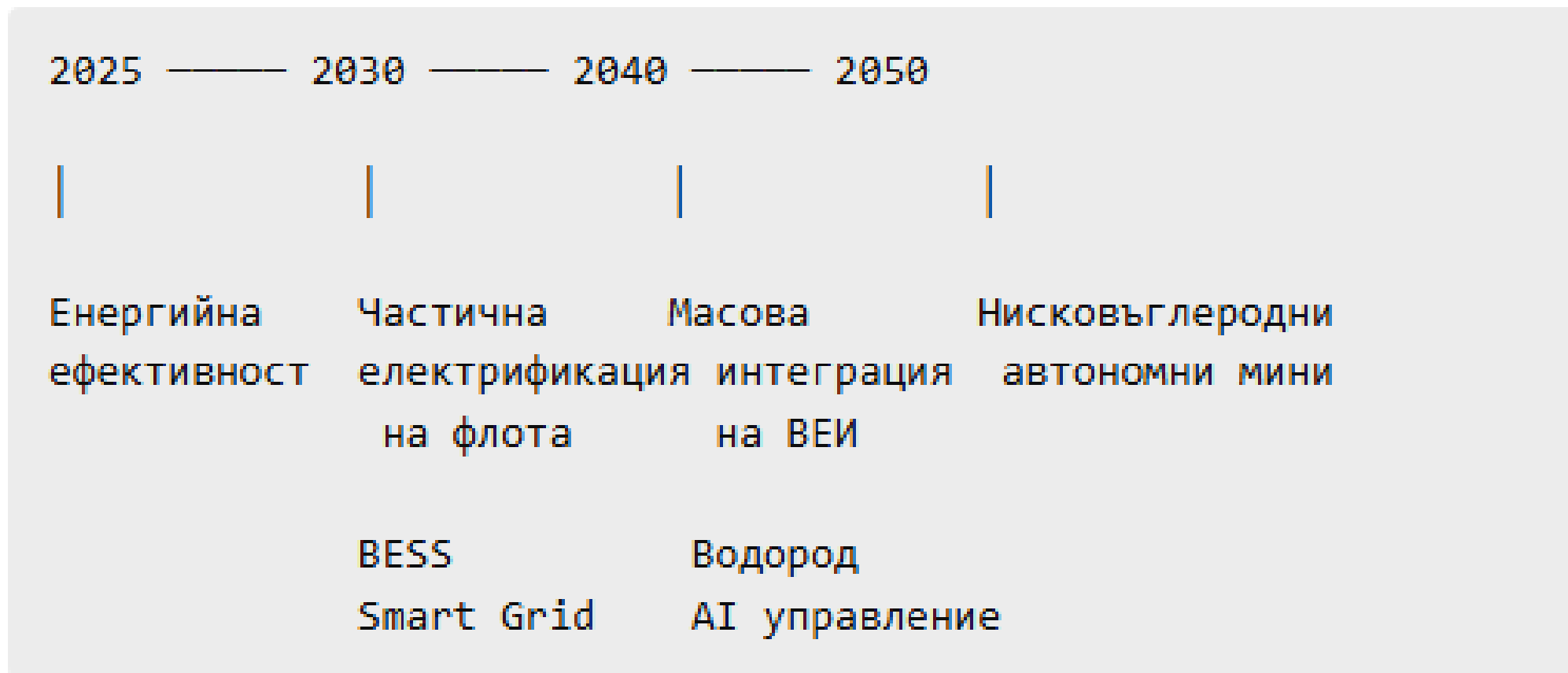
Продължителността на живота на възобновяемите компоненти, съчетана с по-ниски оперативни разходи и разходи за поддръжка, допринася за благоприятна възвръщаемост на инвестициите през жизнения цикъл на системата.

Внедряването на микромрежова технология позволява локализирано разпределение на енергията, улеснявайки по-добър контрол и управление на енергийните потоци.



## Хибридни енергийни системи и декарбонизация на минната индустрия

### Пътна карта за декарбонизация на минната индустрия



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

#### ⚡ Минната индустрия е критична за енергийния преход

- Без критични минерали няма електрификация.

#### ⚡ Електрификацията е неизбежна

- Особено при транспорт и мобилно оборудване.

#### 🔋 ВЕИ + Storage = основа на бъдещите мини

- Микромрежите стават стандарт.

#### 📊 Съхранението е критичният фактор

- Надеждността определя успеха на декарбонизацията.

Минната индустрия е едновременно двигател и предизвикателство на енергийния преход.

Хибридните енергийни системи комбинират:

- **надеждност,**
- **оперативна гъвкавост,**
- **намалени емисии,**
- **по-ниска зависимост от изкопаеми горива.**

Следващото десетилетие ще бъде определящо за прехода към нисковъглеродни автономни минни системи.

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО

Инж. Димитър Куюмджиев