



# Načrt trajnostnega sistema

Sinteza intenzifikacije procesov, eksergijske analize in umetne inteligence

[Prebojna paradigma za inženirje 4.0]

# Paradigmi preskok v inženirstvu



**Trajnost ni zgolj dodatek procesu – je temeljna zahteva načrtovanja, ki zahteva popolno razumevanje celotnega sistema (okolje, ekonomija, družba).**

# Konceptualna triada sistemske trajnosti



**Samostojno optimizirajoča se tovarna z maksimalno rekuperacijo in minimalnim vplivom.**

# Terminološka jasnost: Kaj Intenzifikacija NI



## 1. Optimizacija procesov

**Cilj:** Izboljšanje obstoječega flowsheet-a.

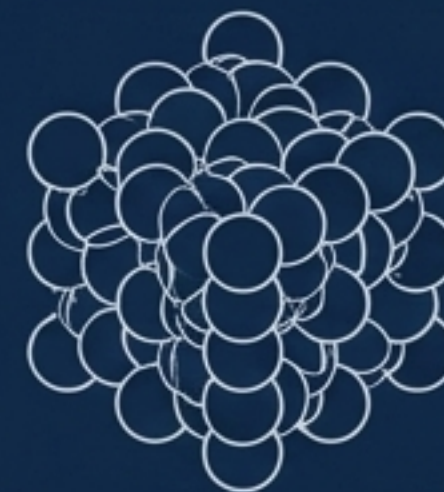
**Pristop:** Spreminjanje obratovalnih pogojev (temperatura, tlak) ali velikosti opreme brez spreminjanja konfiguracije.



## 2. Sinteza procesov

**Cilj:** Iskanje najboljše medsebojne povezanosti enot.

**Pristop:** Sestavljanje optimalnega procesnega diagrama iz baze znanih operacij in metod.

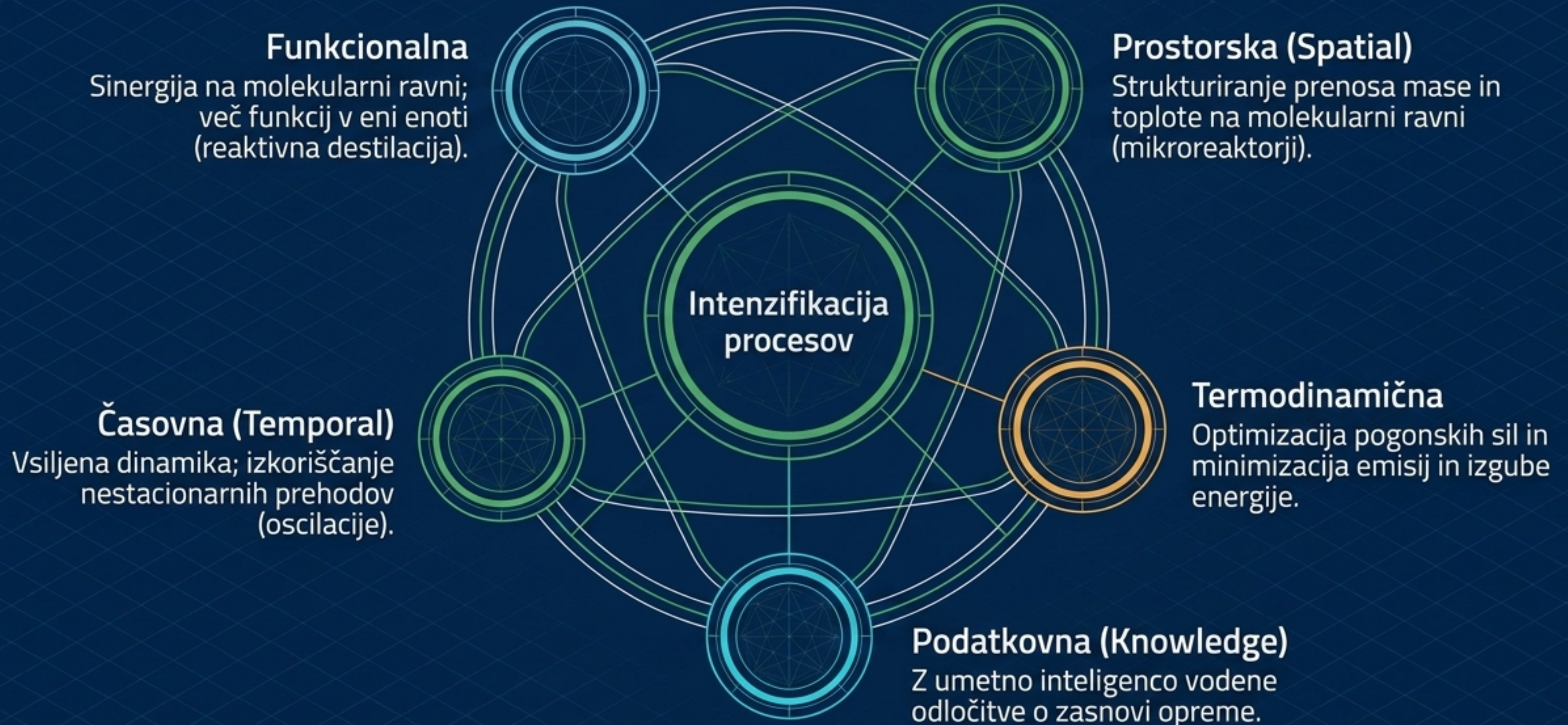


## 3. Intenzifikacija procesov (PI)

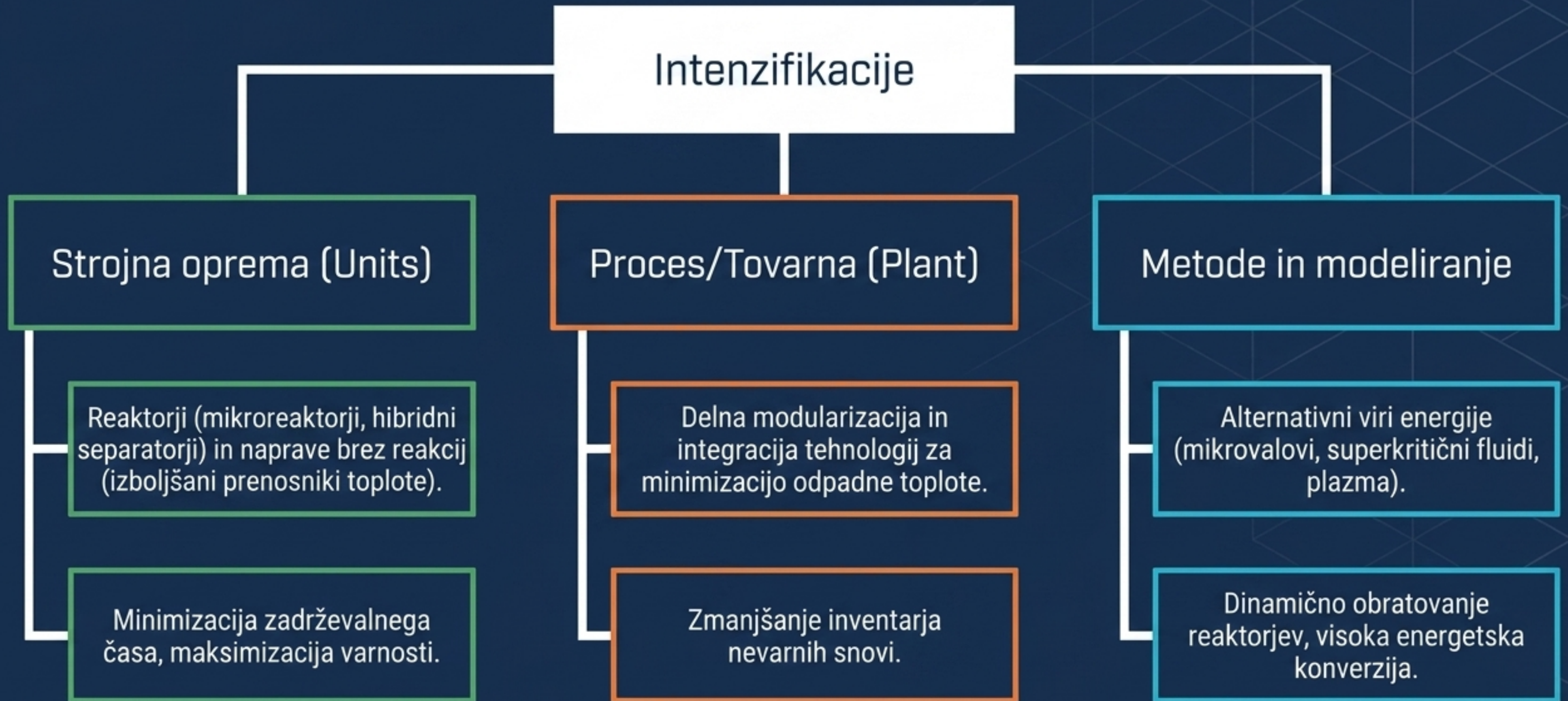
**Cilj:** Popolnoma nova, inovativna oprema ali metode.

**Pristop:** Integracija več nalog (npr. reakcija + separacija) v eno visoko učinkovito napravo na molekularni in termodinamični ravni.

# 5 domen intenzifikacije



# Taksonomija intenzifikacije

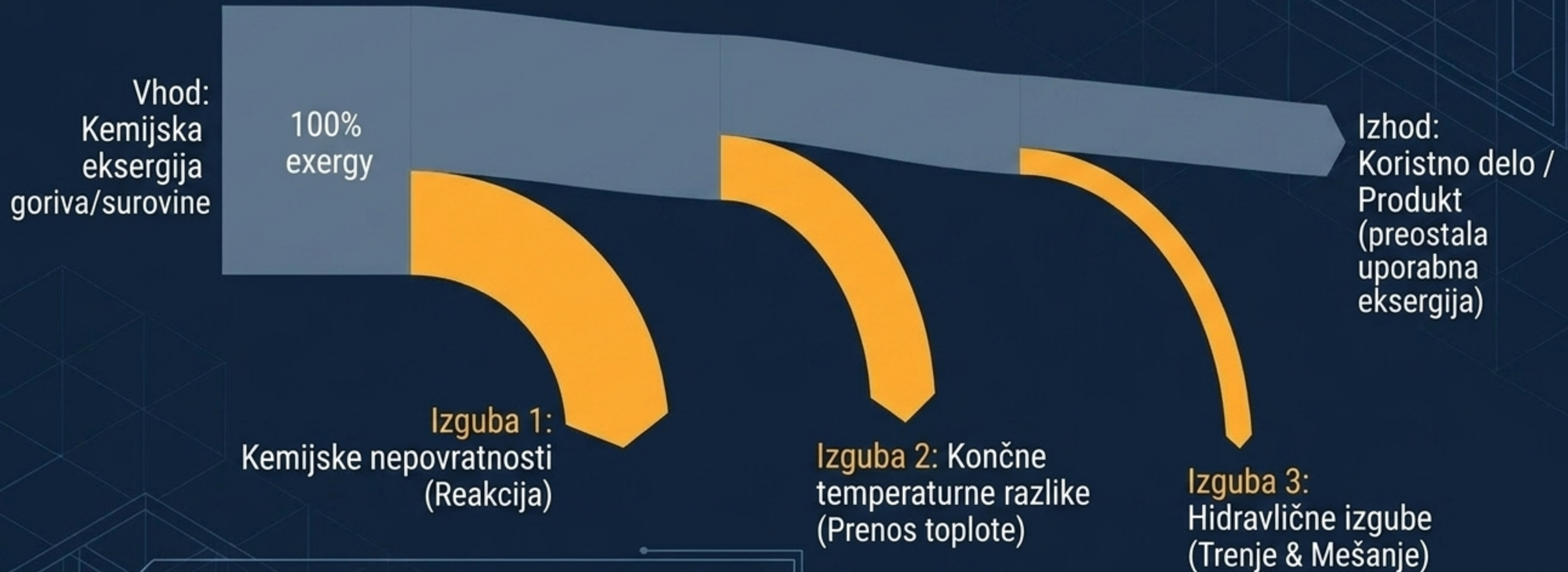


# Energija vs. Eksergija (1. zakon vs. 2. zakon)

Kriterij	Energetska analiza (1. zakon)	Eksergijska analiza (2. zakon)
Fokus	Kvantiteta	Kvaliteta in uporabnost
Ohranitev	Se ohranja v vseh procesih	Se uničuje zaradi nepovratnosti
Identifikacija izgub	Prikrije prave izvore izgub	Natančno locira termodinamične izgube
Potencial za izboljšave	Pogosto ne pokaže rezerve	Vedno pokaže teoretični rob izboljšav

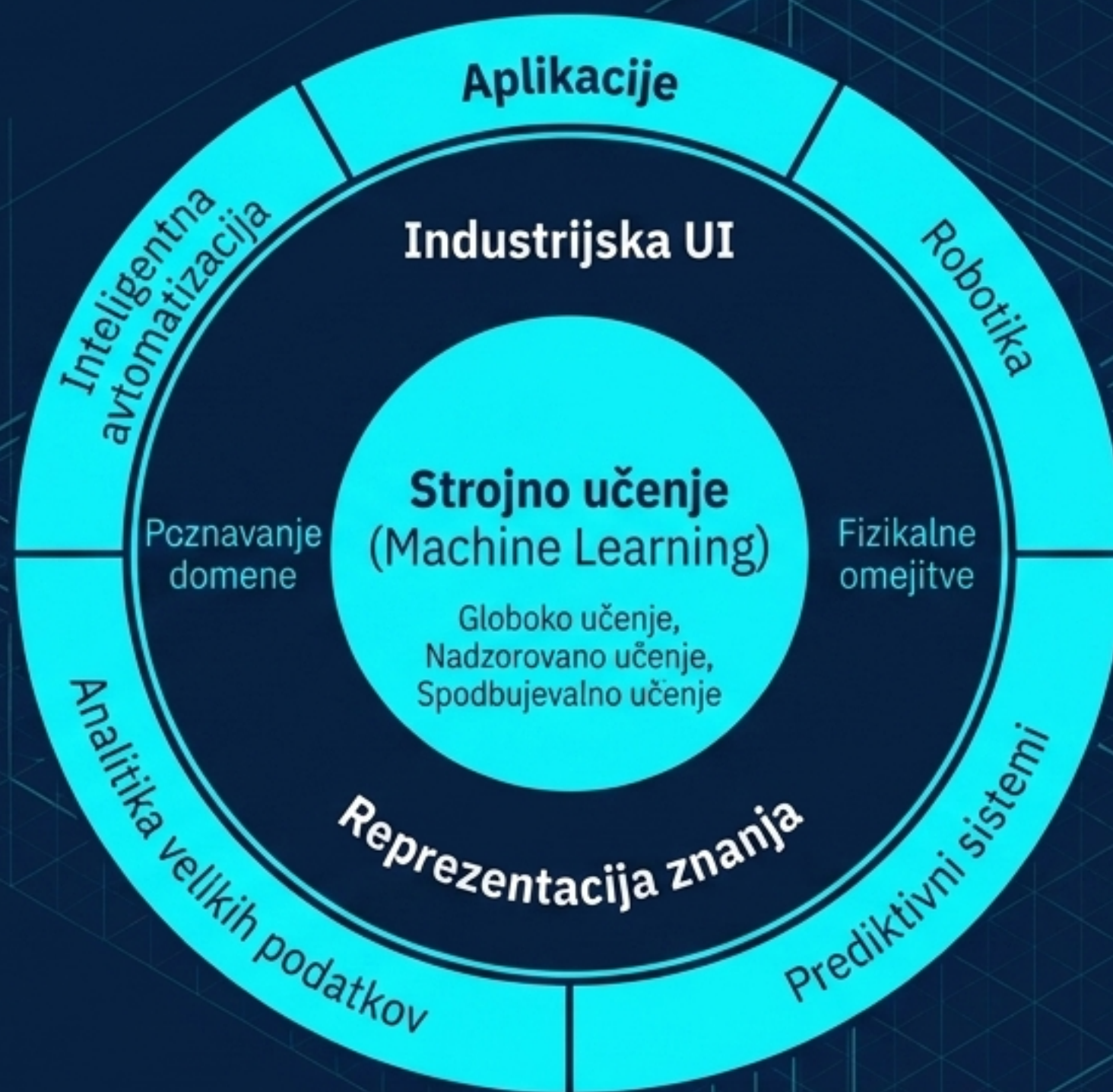
Eksergija je merilo maksimalnega koristnega dela, ko sistem preide v **ravnovesje** z okoljem.

# Vizualizacija eksergijskega uničenja



$E \cdot x_{destroyed}$  ni zgolj izguba energije, temveč trajna izguba sposobnosti opravljanja dela.

# Digitalni možgani: Industrijska umetna inteligenca



**Ključni izziv:** Tradicionalni 'Black-box' modeli (čisto strojno učenje) so za inženirstvo nevarni. Odločitve morajo biti fizikalno utemeljene in razložljive.

# Orodje inženirjev: Hibridno modeliranje

## Osnovni fizikalni principi (First Principles)

- Kemija in termodinamika
- Časovno potratni za izračun
- Ne zajamejo vedno skritih degradacij opreme



## Čisto strojno učenje (Machine Learning)

- Iskanje vzorcev v podatkih
- Krši lahko fizikalne omejitve
- Težko interpretabilno (črna škatlica)



## Hibridni model (AI + Domain Expertise)

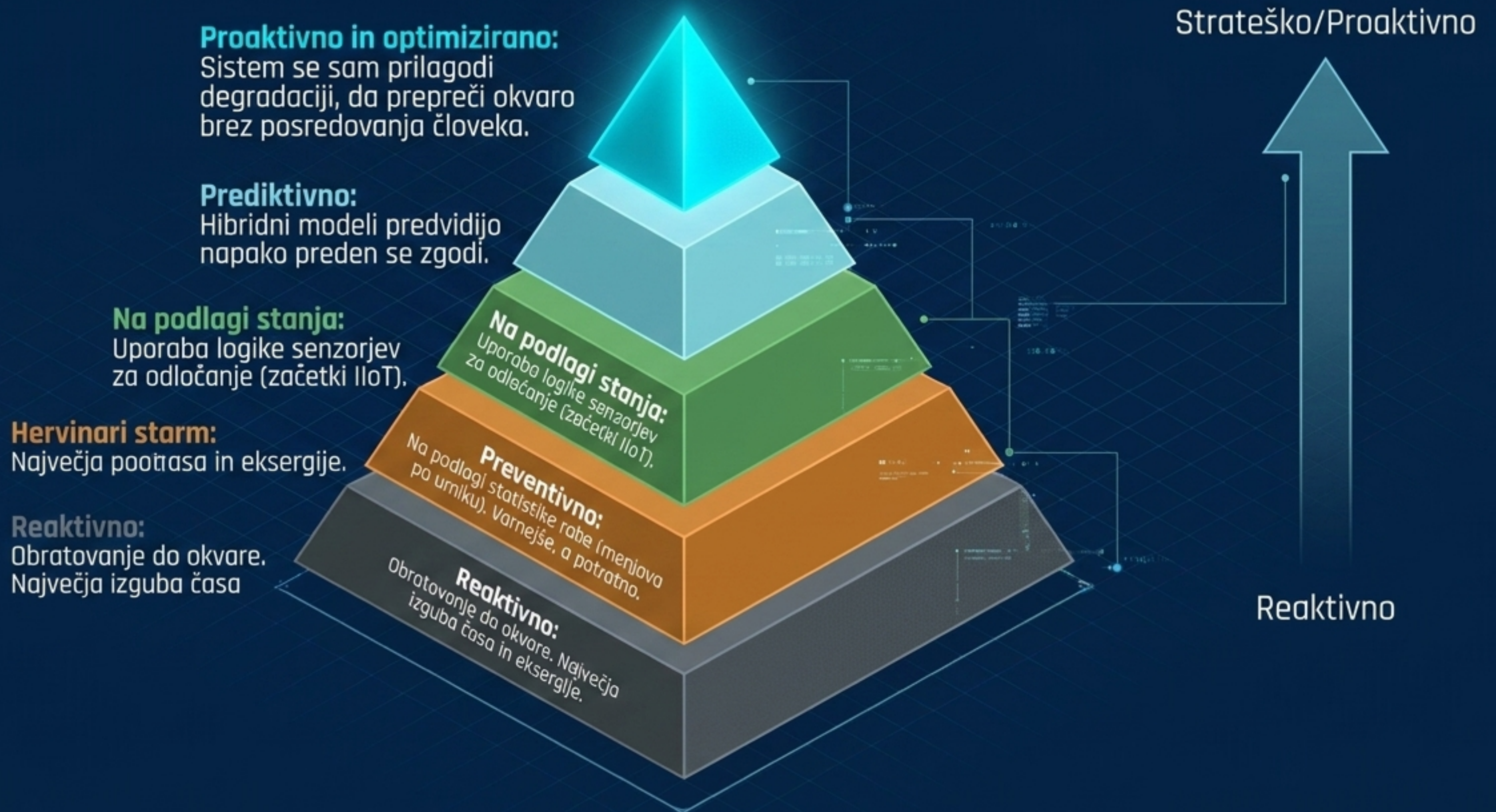
- Združuje domensko znanje in ML
- Hitrejši zagon, manj učnih podatkov
- Zanesljivo ekstrapolira
- Rigorozno spoštuje inženirske omejitve in varnost

# Anatomija digitalnega dvojčka

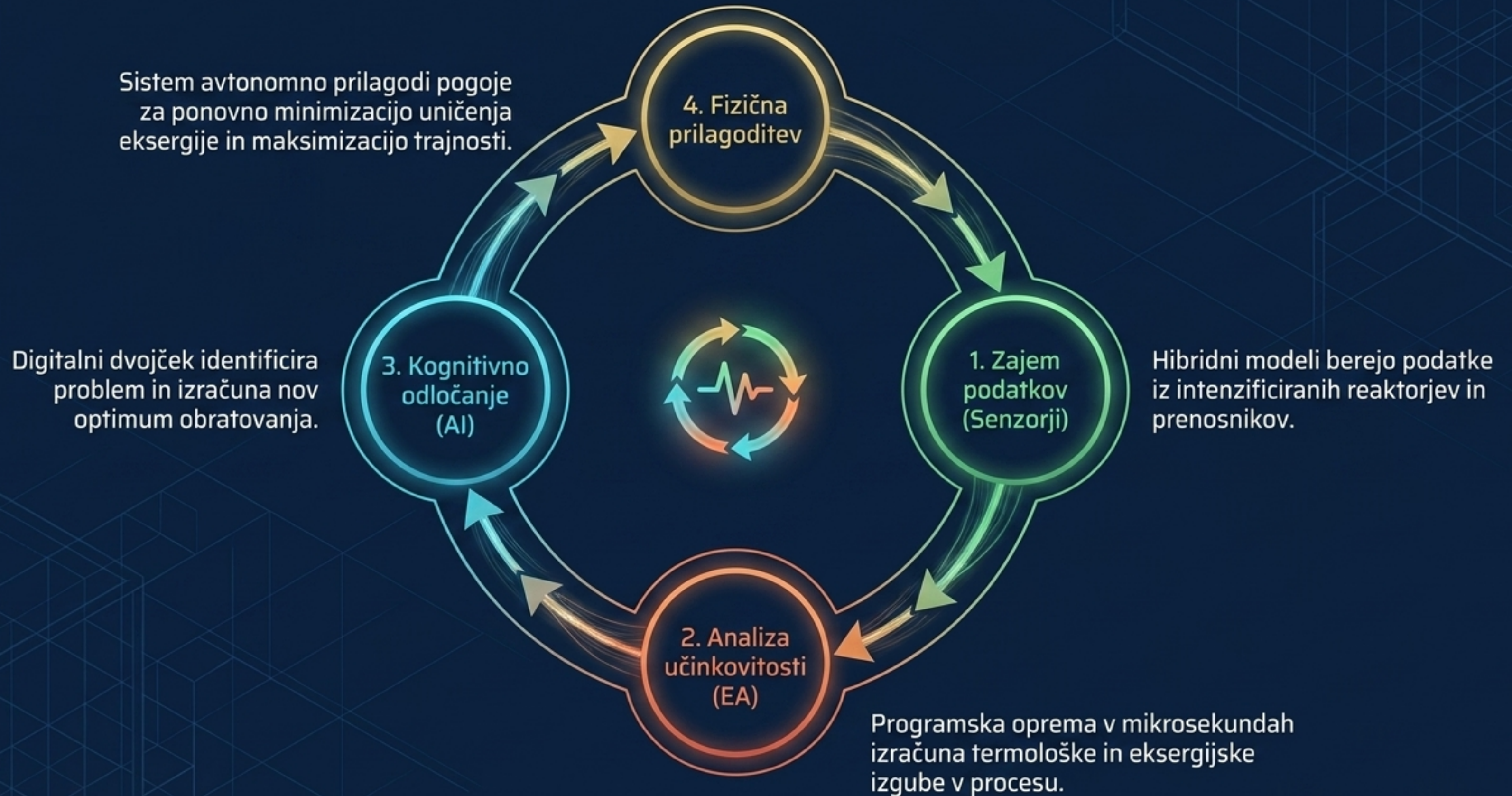


Digitalni dvojček ni le 3D model, temveč živ, odziven virtualni odtis, ki neprestano izmenjuje podatke s fizičnim sistemom.

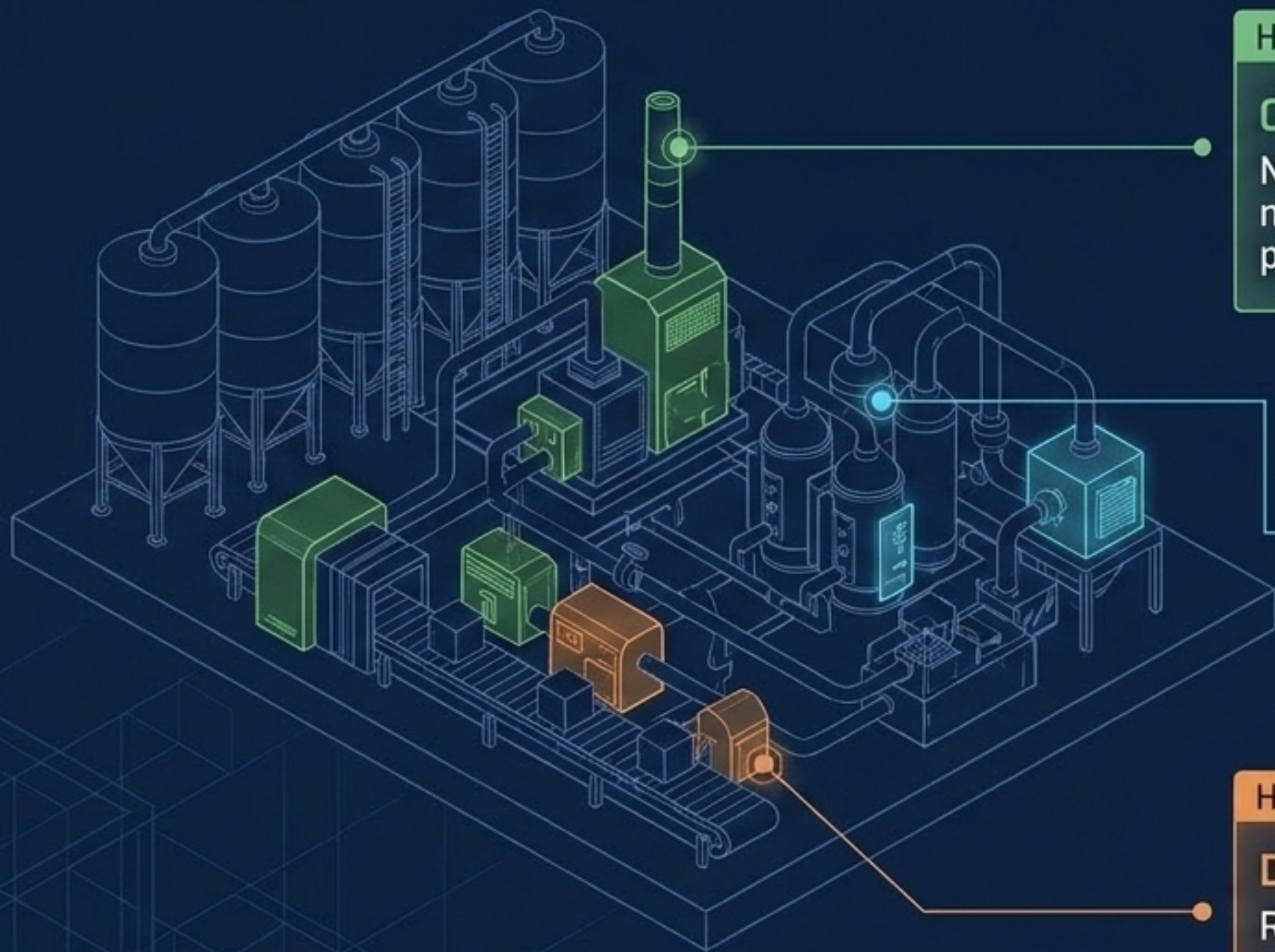
# AI dviguje inženirsko prakso: Hierarhija vzdrževanja



# Nova inženirska paradigma: Zanka sinteze



# Končni cilj: Samostojno optimizirajoča se tovarna



HUD

## Okolje

Neprestano prilagajanje za najnižji ogljični odtis in porabo vode (PI + EA).

HUD

## Ekonomija

Samo-prilagodljivost (Agility).  
Prediktivno vzdrževanje  
izniči zastoje.

HUD

## Družba

Radikalno izboljšana varnost,  
avtonomni nadzor, brez  
nevarnih emisij.

To ni seštevek treh tehnologij, temveč inteligenen organski mehanizem industrije 4.0.

# Inženir kot sistemski arhitekt

Prehod v trajnostno inženirstvo ni izbira – je fizikalna in ekonomska nuja. Zahteve prihodnosti narekujejo, da inženirji razumejo strojno opremo do nivoja molekul (PI), merijo izgube po strogih fizikalnih zakonih (EA) in vodenje prepustijo kognitivnim modelom (AI).

**Trajnost ni ločena disciplina; je vrhunski standard dobrega inženirskega načrtovanja.**

