

SINTETIČNI MOLEKULSKI MOTORJI

JERNEJ ČERNIGOJ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

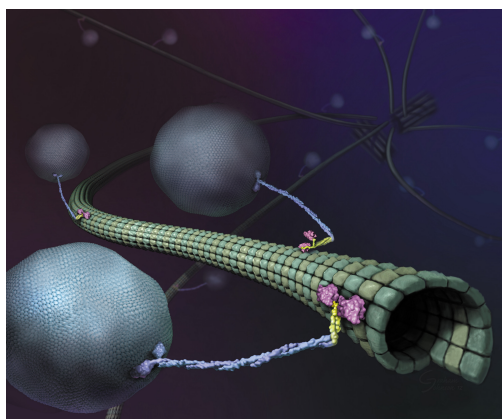
V članku predstavljam nekaj osnovnih značilnosti sintetičnih molekulskih motorjev in njihove termodinamske principe delovanja. Podrobneje bom opisal delovanje sintetičnih proteinskih motorjev in molekularnih pajkov. Prikažem tudi nekaj primerov proučevanja vpliva njihovih lastnosti na njihovo učinkovitost in delovanje.

SYNTHETIC MOLECULAR MOTORS

In this article I present some basic characteristics of synthetic molecular motors and their thermodynamic working principles. In detail I describe the functioning of synthetic protein motors and molecular spiders. I also show a few examples of studies relating their properties to efficiency and performance.

1. Uvod

V živih bitjih lahko opazimo veliko delujočih molekulskih motorjev (slika 1), ki opravljajo ključne vloge pri delovanju in preživetju celic. Iz proučevanja teh bioloških struktur smo se veliko naučili in to znanje uporabili pri načrtovanju in zasnovi umetnih motorjev.



Slika 1. Umetniški prikaz kinezina, ko se premika po mikrotubulu [7].

Tako se je začel razvoj struktur, zgrajenih iz končnega števila molekularnih komponent, ki opravljajo neko delo ob vnosu energije. Takšne strukture se znajdejo v okolju, ki je čisto drugačno od okolja na makro skali. Kot je že Feynman predvideval, se pomembnost določenih sil spremeni. Sila gravitacije postane nepomembna, učinka van der Waalsove sile in površinske napetosti pa se povečata. Prav tako postaneta masa in vztrajnostni moment struktur manj pomembna člena v gibalni enačbi in njuno mesto prevzame viskoznost [1].

Verjetno najpomembnejša razlika med makro in nano strukturami je vpliv termične energije na delce in posledično njihovo naključno termično gibanje oziroma Brownovo gibanje. Če primerjamo maksimalno izhodno moč nekega biološkega motorja (10^{-16} W) z močjo, ki deluje na posamezno molekulo zaradi termičnega gibanja (10^{-8} W), vidimo, da je slednja pri sobni temperaturi za več velikostnih redov večja. Tudi če bi naš sistem ohladili, bi termična energija ostala prevladujoča in jo zato raje poskušamo izkoristiti. Nastali so različni miselni stroji, ki so izkoriščali Brownovo gibanje delcev in tako predstavili načelo delovanja kasneje razvitih molekulskih motorjev [2].

2. Kaj so sintetični molekularni motorji

Molekularni motor je sestavljen iz končnega števila atomov in iz vložene energije proizvaja usmerjeno gibanje dela motorja ali celega motorja. Končni rezultat je opravljeno delo. Energijo običajno dovajamo v obliki svetlobe, toplote, kemijske energije ali elektrokemijske potencialne razlike. Molekularni motorje pogosto zamenjujejo za molekularna stikala, ki pa za razliko od motorjev ne opravljajo dela [2]. Motorji so lahko rotacijski ali linearni. Rotacijski motorji opravljajo ponavljajoče krožno gibanje. Sestavljeni so iz statorja, ki je običajno pritrjen na površino, in iz rotorja, ki opravlja krožno gibanje. Linearni motorji se celi premikajo v smeri, ki jo določa prej izdelana pot. Vsi motorji morajo biti sposobni premagovati neko silo oziroma navor [1].

2.1 Vrste sintetičnih molekularnih motorjev

Do danes je bilo razvitih že kar nekaj vrst molekularnih motorjev. Poleg prej opisane delitve na rotirajoče in linearne motorje, bi bila možna delitev tudi glede na vrsto izkoriščene energije, saj poznamo motorje, ki izkoriščajo energijo v obliki svetlobe, toplote, kemijske energije ali spremembo kemijskega potenciala. Razlike med motorji so tudi glede na njihovo velikost, učinkovitost in potrebo po dodatnih strukturah za njihovo delovanje.

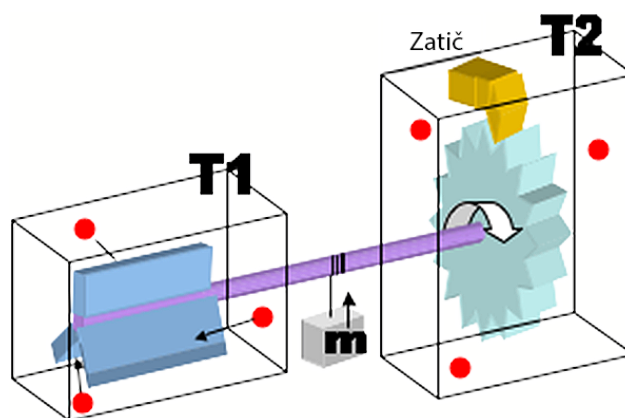
V tem članku bom podrobneje predstavil delovanje dveh linearnih motorjev. Prvi so sintetični proteinski motorji, drugi pa molekularni pajki. Sintetični proteinski motorji izkoriščajo umetno povzročene razlike v kemijskem potencialu [4], molekularni pajki pa kemijsko energijo kemijskih reakcij [8]. Sintetični proteinski motorji so veliki nekaj 10 nm in lahko potujejo s hitrostjo okrog 40 nm/ms [9], medtem ko so molekularni pajki podobne velikosti, vendar potujejo s približno 10 nm/min [4].

3. Principi delovanja molekularnih motorjev

Že na samem začetku razvoja molekularnih motorjev so se pojavile različne ideje, kako bi lahko izkoriščali termično gibanje, ne da bi kršili entropijski zakon. Ena izmed takih miselnih naprav je tudi Feynmanov "Ratchet and Pawl" (slika 2). Sestavljena je iz osi, na katero so nameščene lopatice. Ta del se nahaja v snovi s temperaturo T_1 . Na drugem koncu osi je pritrjen zobnik z enosmernim zatičem pri temperaturi T_2 . Obenem je na sredino osi privezana majhna utež. Molekule plina se prosto gibljejo po posodi in trkajo v lopatice sistema, katere se pa zaradi enosmerne zatiča lahko vrtijo le v eno smer. Ko trči molekula v pravi smeri, se sistem zavrti. Vendar, da sistem deluje mora biti $T_1 > T_2$, saj se tudi zatič trese zaradi termične energije in ko je $T_1 = T_2$ zatični sistem ne deluje več, ker so tresljaji tako veliki, da zatič preskakuje zobnike. Delovanje sistema lahko razložimo tudi z entropijskim zakonom, saj ta zahteva, neko temperaturno razliko in pretok toplote za opravljanje dela. Torej če sta temperaturi T_1 in T_2 enaki, potem sistem ne more opravljati dela, saj pri tem ne more biti izmenjana nobena toplota. Če pa je $T_1 > T_2$, potem lahko sistem opravi delo, saj toplota preide iz posode 1 v posodo 2.

Taki sistemi, ki izkoriščajo Brownovo gibanje delcev, imajo 3 glavne značilnosti: gibanje delcev je naključno, potreben je dovod proste energije, v obliki toplotnega potenciala, kemijske energije ali elektro kemičnega potenciala, in potrebna je nesimetričnost potenciala, ki usmerja gibanje.

Delovanje takih sistemov si lahko tudi predstavljamo s pulzirajočim žagastim potencialom (slika 3). Najprej imejmo vse delce v enem energetskem minimumu. Ko izključimo potencial, se delci začnejo prosto gibati zaradi termične energije. Kmalu za tem, ko še niso v termičnem ravnovesju, ponovno vključimo potencial. Ker je naš potencial asimetričen, se delci v povprečju premaknejo naprej v smeri položnejše stranice potenciala. Podoben rezultat lahko dosežemo, če imamo časovno konstanten asimetričen potencial, spreminjamo pa termično energijo delcev. Ko termična energija preseže



Slika 2. Sistem "Ratchet and Pawl" je sestavljen iz osi, na katero so na enem koncu pritrjene lopatice, na drugem pa zobnik z enosmernim zatičem, ki omogoča vrtenje sistema le v izbrano smer. Molekule plina pri temperaturi T_1 trkajo v lopatice in sistem vrtijo v dovoljeno smer [6].

vrhove potenciala, delci prosto difundirajo in ko energijo zmanjšamo, se preko poševnega potenciala premaknejo v zeleno smer [2].

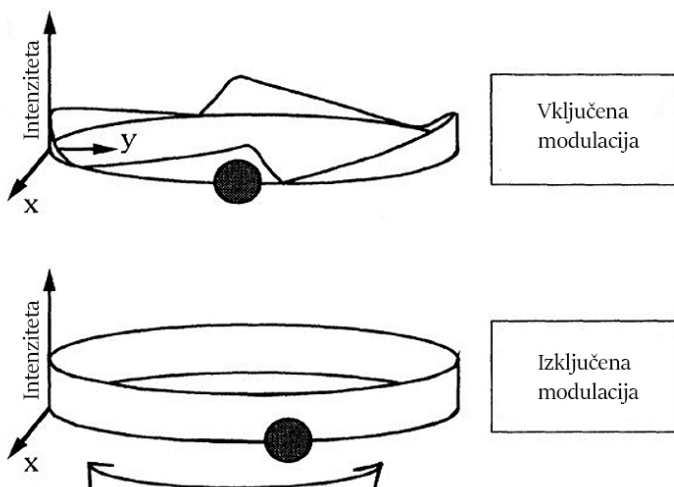
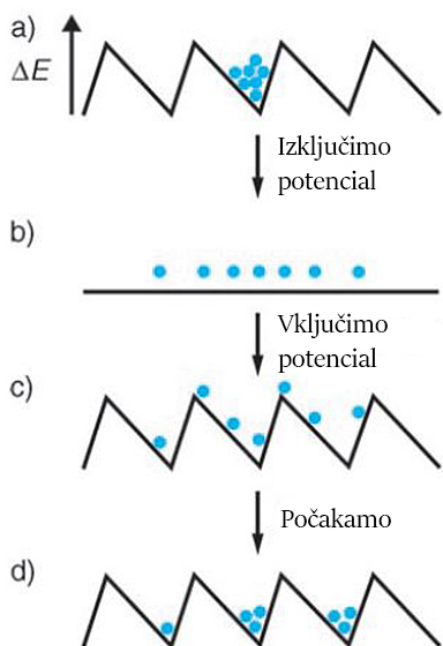
Take pulzirajoče potenciale lahko naredimo na več načinov. En način je z uporabo optične pincete, ki je pravzaprav močen fokusiran laserski žarek (slika 4). Ta deluje kot privlačni potencial za dielektrične delce. Laserski žarek s pomočjo zrcal premikamo tako, da opiše krožnico na neki ravnini. To premikanje poteka z veliko frekvenco tako, da delec v povprečju ne čuti nobene sile v smeri kroženja. Dobimo potencialni minimum v obliki krožnice. Delec se ujame v ta potencialni minimum in se po njej difuzno premika. Če sedaj ustrezno moduliramo intenziteto laserja, lahko iz konstantnega potenciala naredimo žagasti potencial. Modulacijo izmenično vključujemo in izključujemo, ter s tem dobimo pulzirajoči žagasti potencial [10].

4. Sintetični proteinski motorji

Proteinski motorji se zgledujejo po biološkem proteinskem motorju kinezinu. Motor je linearen in se premika po prej iz DNK (Deoksiribonukleinska kislina) zgrajeni verigi. Kot je že razvidno iz imena, je sestavljen iz proteinskih molekul, ki zaradi velike zaloge različnih aminokislin omogočajo izgradnjo željenih proteinov in obenem dopuščajo dovolj raznovrstnosti za dodatne optimizacije motorjev. Za motor je značilno, da ima tri v obliko črke Y postavljene noge, sestavljene iz obvite vijačnice, na katero so pritrjeni trije različni vezavni proteini (Ra, Rb in Rc). Vsak izmed teh proteinov se lahko veže le na določeno vezavno mesto na DNK verigi ob prisotnosti ustreznega liganda (a,b,c)(slika 5) [4].

4.1 Delovanje

Za delovanje proteinskega motorja potrebujemo ustrezno iz DNK izdelano verigo. Ta je zgrajena iz ponavljajočega se zaporedja vezavnih mest, ki ustrezajo vezavnim proteinom Ra, Rb in Rc. Vsaka noga motorja se na vezavno mesto trdno veže le ob prisotnosti ustreznega liganda; ko koncentracija liganda v okolici upade, vez popusti in noga ni več trdno vezana na vezavno mesto. Če ciklično spreminjamo koncentracijo ligandov v okolici (ab, bc, ca), povzročimo, da bosta nekaj časa pritrjeni nogi Ra in Rb, potem, ko spremenimo koncentracijo ligandov v bc, bo noga Ra postala prosta, noga Rc pa se bo povezala. Tako lahko z ustreznim spreminjanjem koncentracij ligandov povzročimo, da se motor premika naprej po verigi (slika 5). Med posameznim korakom, ko je motor pritrjen samo z eno nogo, se nevezana noga difuzivno premika, dokler ne najde ustreznega vezavnega mesta. Za



Slika 3. Prikaz delovanja pulzirajočega žagastega potenciala. Najprej imamo vse delce zbrane v enem potencialnem minimumu. Ko žagasti potencial izključimo, se začnejo delci prosto termično gibati. Po določenem času potencial spet vključimo in delci se pomaknejo v potencialne minimume. Vidimo, da se je skupno težišče delcev premaknilo v izbrano smer [2].

Slika 4. Spodaj: Prikaz potenciala, ki ga ustvarja hitro krožeča optična pinceta. Zgoraj: Intenziteto laserja moduliramo z 4-kratno frekvenco kroženja optične pincete. Manjšanje in večanje moči laserja ne poteka enako hitro, kar povzroči žagasto obliko potenciala. Če sedaj vključujemo in izključujemo modulacijo moči laserja, dobimo pulzirajoč žagast potencial [10].

pravilno delovanje motorja mora biti čas menjave ligandov ustrezno dolg, da tretja noga že poišče svoje vezavno mesto (difuzijski čas), a obenem ustrezno kratek, da dosežemo čim večjo hitrost premikanja.

4.2 Vpliv značilnih časov na delovanje

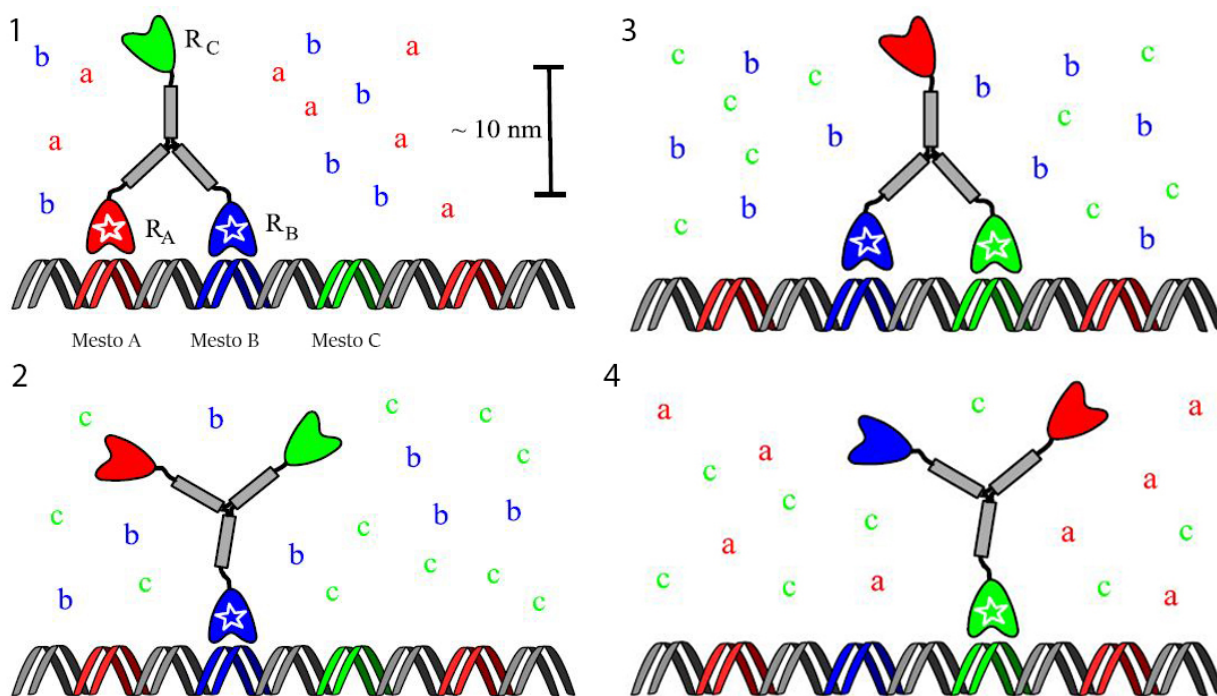
Vpliv značilnih časov na hitrost in zanesljivost proteinskih motorjev proučujemo s sistemom diferencialnih enačb za prehod med določenimi stanji

$$\frac{\partial}{\partial t} p(t) = M(t)p(t), \quad (1)$$

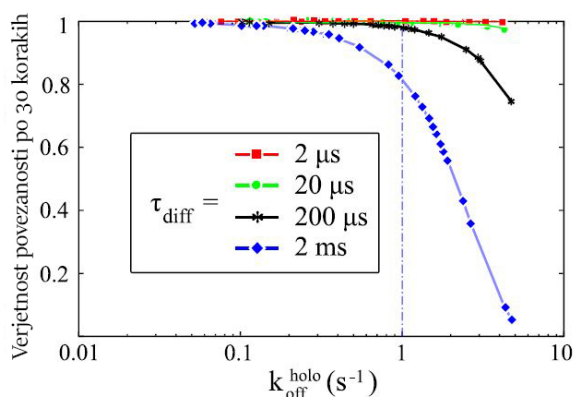
kjer je $M(t)$ matrika verjetnosti za prehod med posameznimi stanji. Vseh možnih stanj je 80, saj imamo 3 noge, ki so lahko vezane na 10 različnih načinov (nobena, samo ena (Ra,Rb,Rc), dve(RaRb, RbRc, RaRc) in vse tri noge vezane (RaRbRc, RbRcRa, RcRaRb)). Obenem pa je lahko tudi 8 različnih kombinacij prisotnih ligandov (noben, samo en (a,b,c), dva (ab,bc,ca) in vsi trije (abc)). Kljub velikem številu stanj jih je veliko malo verjetnih, tako da je tak sistem rešljiv. Na ta način poiščemo ustrezne lastnosti motorja, da bo čim bolj učinkovit [3].

Ugotovimo, da manjši, kot je difuzijski čas, večja je verjetnost, da je motor še vezan na tir. To je posledica tega, da se lahko tudi ob prisotnosti ligandov zgodi, da vez med tirom in nogo popusti ($k_{\text{off}}^{\text{holo}}$ značilni čas vezave ob prisotnosti liganda). Zato želimo čimbolj zmanjšati čas, ko je motor povezan na tir le z eno nogo (slika 6).

Na učinkovitost korakanja ima velik vpliv tudi, kako hitro uspemo zamenjati koncentracije ligandov. Tega seveda ne moremo narediti hipoma, zato so med menjavo prisotni vsi trije ligandi



Slika 5. Zaporedje korakov proteinskega motorja: Motor je najprej pritrjen na tir z dvema nogama Ra in Rb. V drugem koraku se koncentracija ligandov spremeni iz kombinacije a in b v b in c. To povzroči, da se noga Ra sprosti. Obenem se lahko sedaj noga Rc poveže, saj je prisoten ustrezen ligand. Sedaj je motor opravil en korak [3].

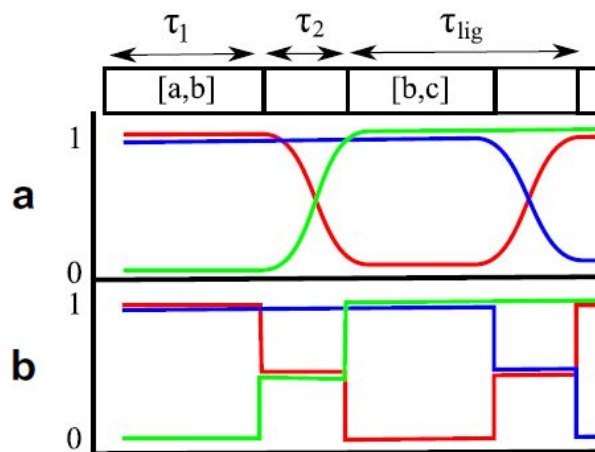


Slika 6. Graf prikazuje verjetnost, da je motor še vezan na tir po 30 korakih v odvisnosti od hitrosti prekinitve vezi med nogo in tirom ob prisotnosti liganda $k_{\text{off}}^{\text{holo}}$. Ta je običajno reda 10^{-2} s^{-1} . Prikazane so odvisnosti za 4 različne difuzijske čase τ_{diff} . Manjši, kot je difuzijski čas, večja je verjetnost, da je motor še vezan pri enaki vrednosti $k_{\text{off}}^{\text{holo}}$ [3].

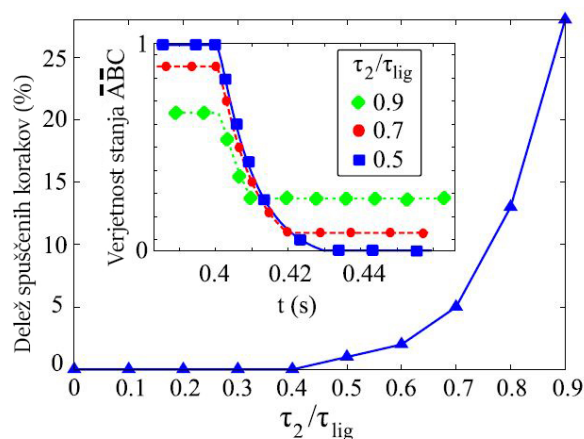
(slika 7) in motor lahko ostane vezan na isto vezavno mesto ter ne naredi koraka naprej. Ugotovimo, da mora biti za minimalno možnost zastoja čas mešanja dolg največ $0,4 \tau_{\text{lig}}$ časa ene faze ligandov (slika 8) [3].

5. Molekularni pajki

Molekularni pajki so sintetični molekularni motorji, zgrajeni iz togega osrednjega telesa na katero so pritrjene encimske noge (slika 9). Noge so zgrajene iz ustreznega DNK zaporedja (E na sliki 10), ki se lahko veže na ustrezno nasprotno zaporedje DNK, ki predstavlja vezavno mesto (S) [8]. Pajkova noga je opremljena tudi z encimskim delom, ki ima nalogo, da s kemijsko reakcijo spremeni vezavno mesto v produktno mesto, to naredi s hitrostjo k_c . V praksi to dosežemo tako, da encim pretrga vezavno mesto S na dva dela P1 in P2. Del vezavnega mesta S ostane vezan na ogrodje tira (P1), drugi del pa zapusti tir (P2) v karakterističnem času k_r^{-1} . Če se sedaj noga pajka veže na produktno

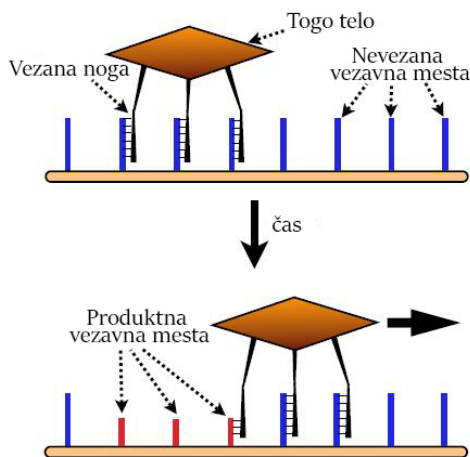


Slika 7. Prikaz poteka realnih koncentracij ligandov zgoraj. Spodaj prikazano poenostavljeno spreminjanje koncentracij ligandov uporabljeno v izračunu. τ_1 je čas, ko sta prisotna le dva liganda, τ_2 pa čas, ko so prisotni vsi trije ligandi [3].



Slika 8. Večji graf prikazuje verjetnost, da motor ne naredi koraka naprej, ker so prisotni vsi trije ligandi in ostane vezan na isto mesto. Manjši graf pa prikazuje verjetnost, da je motor vezan z nogami Ra in Rb na prehodu med stanjema z ab in bc ligandoma, pri različnih vrednostih razmerja med časom, ko so prisotni vsi trije ligandi in časom ene faze ligandov [3].

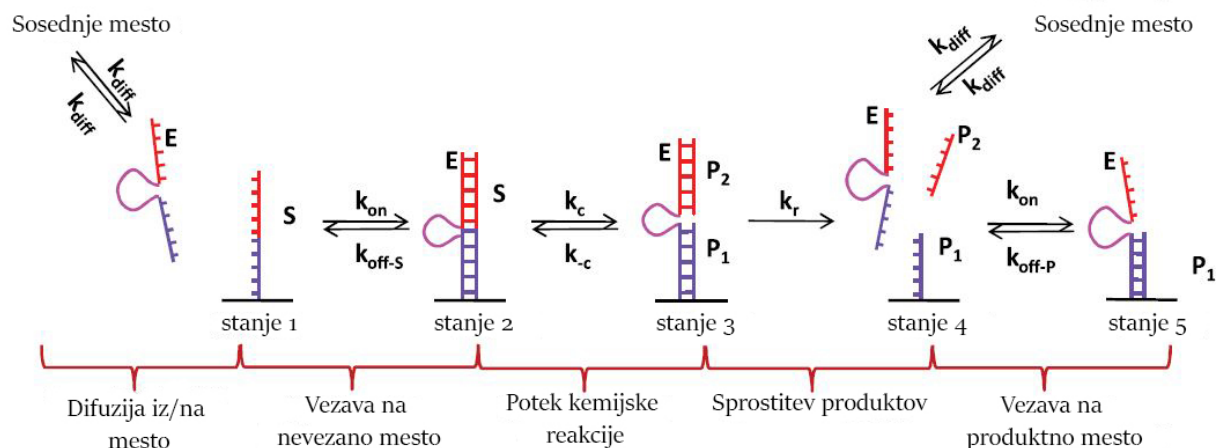
vezavno mesto P1, je ta vezava šibkejša kot na vezavno mesto S, saj je sedaj povezan le del pajkove noge. Ker je med nogo in mestom P1 šibkejša vez, je hitrost prekinitve vezi k_{off-P} večja kot hitrost kemijske reakcije na mestu S (k_c). Ker so torej noge manj časa vezane na produktna mesta P1, kot pa na nevezana vezavna mesta S, dosežemo, da se molekularni pajek giblje naprej po tirnici, kjer so nevezana vezavna mesta [5].



Slika 9. Shematski prikaz delovanja molekularnega pajka s tremi nogami. Vezavna mesta se po prvi vezavi spremenijo in postanejo slabše vezljiva [8].

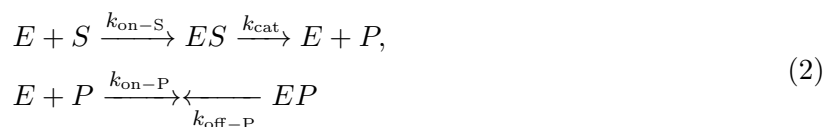
5.1 Odvisnost števila nog na delovanje pajkov

Molekularni pajki imajo lahko na telo pritrjeno različno število nog. Od števila nog je odvisno, kako hitro se bodo premikali, kakšni sili lahko nasprotujejo in kakšna je verjetnost, da padejo s proge. To odvisnost lahko proučujemo s simulacijami velike populacije pajkov. Uporabimo metodo Monte Carlo simulacij z Gillespijevim algoritmom. Ta iz začetnega stanja in karakterističnih časov



Slika 10. Prikaz interakcije pajkove noge z vezavnim mestom. Noga se veže na vezavno mesto S , ki je še nedotaknjeno, tam potem poteče kemijska reakcija, ki pretga vez med dvema deloma vezavnega mesta. Noga pajka potem zapusti vezavno mesto in lahko difundira do naslednjega vezavnega mesta S , ali pa se ponovno veže na produktno vezavno mesto P_1 [5].

izračuna naslednje stanje vsakega molekularnega pajka. Stanja, v katerih se znajdejo pajkove noge in prehode med njimi opišemo s preprostim diagramom stanj:



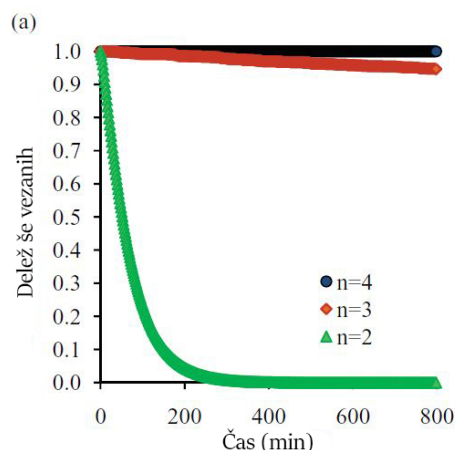
Tu E predstavlja nogo, S začetno vezavno mesto, P produktno vezavno mesto. Prehode med stanji opisujejo karakteristični časi (k^{-1}), kjer smo združili k_c in k_r v k_{cat} . Ker je difuzijski čas noge na dolžini enega koraka (9 nm) za več redov manjši od časa, potrebnega za biokemijsko reakcijo na vezavnem mestu ($k_{\text{on-S}} + k_{\text{cat}}$), lahko predpostavimo, da se to zgodi v trenutku ($k_{\text{diff}} \rightarrow \infty$). Zaradi poenostavitve rečemo, da se lahko noga enako hitro veže tudi na že izrabljeno mesto ($k_{\text{on-S}} = k_{\text{on-P}}$), vendar je karakteristični čas, ko ostane noga vezana na to mesto ($k_{\text{off-P}}^{-1}$), manjši od časa ki je potreben za kemijsko reakcijo (k_{cat}^{-1}).

Sedaj, ko poznamo delovanje posamezne noge, lahko proučimo vpliv različnega števila nog in njihovih dolžin na gibanje motorja. Več nog kot ima motor, več je različnih kombinacij, kako je lahko motor vezan na progo in posledično manjša verjetnost za stanja, ko je povezan le z eno nogo, kar predstavlja nevarnost, da se motor v celoti odveže od proge (slika 11). Tako so motorji z več nogami dlje časa vezani na progo in opravijo več krakov, preden padejo iz proge. Povečano število nog motorje upočasnjuje in ti počasneje napredujejo po progi kot dvonogi motorji, ki so najhitrejši, vendar pa pogosto padejo s proge (slika 12). Gibanje pajkov lahko pospešimo, če jim podaljšamo noge in s tem njihov doseg (slika 13). Sedaj imajo na voljo več novih vezavnih mest, na katere se lahko vežejo in z vsakim korakom lahko premagajo večjo razdaljo.

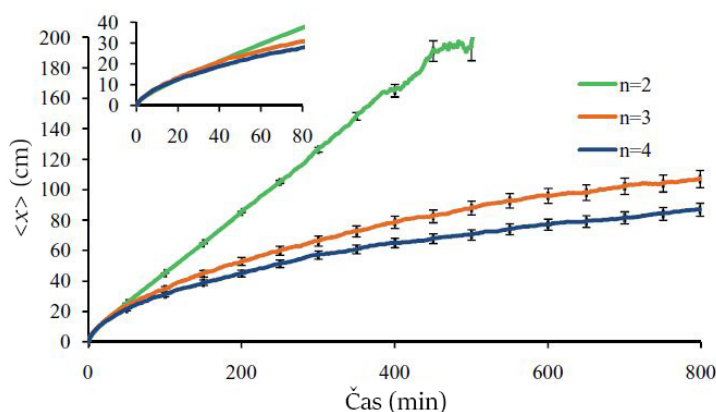
Na motorje lahko delujemo z neko silo in merimo, koliko dela opravljajo. Glede na opravljeno delo lahko izračunamo njihov izkoristek glede na vneseno energijo. Ta je enaka sproščeni prosti entalpiji med kemijsko reakcijo ob vezavi noge na vezavno mesto ΔG .

$$\eta_{\Delta t}(F, t) = \frac{F \langle \Delta x(F, t) \rangle_{\Delta t}}{\Delta G \langle N(F, t) \rangle_{\Delta t}}, \tag{3}$$

Če sedaj vzamemo povprečno učinkovitost v $\Delta t = 100$ s, ki jo izračunamo kot količnik med delom na opravljeni razdalji in energijo, ki se sprosti, ko pajek prepotuje neko število vezavnih mest, lahko

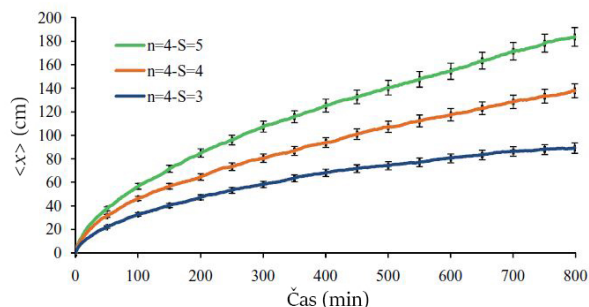


Slika 11. Graf prikazuje delež motorjev, ki so še vezani na tir po nekem času. Vidimo, da motorji z dvema nogama precej hitreje padajo s tira kot pa motorji s tremi ali štirimi nogami. Z vsak tip motorjev je bilo simuliranih 10^6 motorjev [5].

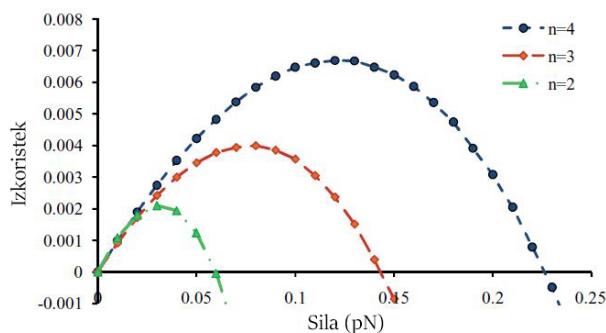


Slika 12. Graf prikazuje povprečno prepotovano pot (število vezavnih mest) v določenem času. Iz strmine grafa lahko vidimo hitrost posameznih vrst motorjev, kjer n predstavlja število nog motorja. Motorji z več nogami so počasnejši od tistih s samo dvema. Pri motorjih z večimi nogami je opazno to, da se jim ob kasnejših časih hitrost zmaša glede na začetne. To je posledica neidealnih korakov, ko naprimer na vezavnem mestu ne poteče kemijska reakcija do konca. Noga zapusti vezavno mesto in tam ne ostanejo produkti, ampak čisto vezavno mesto. Tako bo za motor ugodno, tudi če naredi korak nazaj, kar pa upočasni njegovo napredovanje naprej po tiru [5].

primerjamo, kakšna je odvisnost izkoristka od števila nog pri določeni sili (slika 14). Ugotovimo, da je motor z več nogami sposoben premagovati večjo silo pri večjem izkoristku kot pa motor z manj nogami. Ugotovimo lahko tudi, da se izkoristek molekularnih pajkov ne more primerjati z izkoristkom biološkega kinezina, ki doseže tudi do 50% izkoristek [5].



Slika 13. Graf prikazuje odvisnost poti molekularnih pajkov od maksimalnega dosega nog pajka (S). Povečan doseg nog omogoča daljše korake in tako lahko pajki z večjim dosegom potujejo hitreje kot pajki z manjšim dosegom. Dodatna prednost za pajke z večjim dosegom je ta, da jih ostane več vezanih na progo po nekem času [5].



Slika 14. Graf prikazuje odvisnost izkoristka od sile, s katero je posamezen pajek obremenjen. Vidimo, da izkoristek sprva narašča do maksimalnega izkoristka. Potem se izkoristek zmanjšuje, saj noge pajka težje difundirajo naprej proti naslednjem vezavnemu mestu. Izkoristek se zmanjšuje, dokler ne pride na 0 pri sili, ki motor zaustavi. Motorji z večjim številom nog dosežejo večji izkoristek in večjo zaustavitveno silo [5].

6. Zaključek

Molekularni motorji in molekularne naprave so trenutno še na začetku svojega razvoja. Kot smo spoznali v članku, je njihovo delovanje še precej omejeno in njihovi izkoristki se še ne morejo primerjati z biološkimi molekularnimi motorji. Vendar smo, kljub posebnim pogojem, s katerimi se motorji soočajo, uspeli izdelati delujoče sisteme, ki opravljajo delo. Taki sistemi predstavljajo velik potencial za prihodnost, saj so osnova za vse vrste molekularnih naprav. Raziskovalcem je tudi že uspelo narediti nekaj naprav, kot jih poznamo na makroskopski ravni, na primer molekularne škarje, nano avtomobil, molekularno samokolnico, molekularni giroskop [2].

LITERATURA

- [1] J.R. Quinn: *Synthetic molecular motors*, University of Illinois, organic chemistry seminar (2003), 58–64.
- [2] E.R. Kay, D.A. Leigh in F. Zerbetto, *Synthetic Molecular Motors and Mechanical Machines*, *Angewandte Chemie* **46** (2007), 72–191.
- [3] N.J. Kuwada, G.A. Blab in H. Linke, *A classical Master equation approach to modeling an artificial protein motor*, *Chemical Physics* **375** (2010), 479–485.
- [4] N.J. Kuwada, M.J. Zuckermann, idr., *Tuning the performance of an artificial protein motor*, *Physical Review E* **84**, 031922 (2011).
- [5] L. Samii, idr., *Time-dependent motor properties of multipedal molecular spider*, *Physical Review E* **84**, 031111 (2011).
- [6] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Feynman_ratchet.png], (3.8.2016).
- [7] [<https://emilysevolution.wordpress.com/2015/09/23/post-1-4-i-like-to-move-it-move-it/>], (3.8.2016).
- [8] O. Semenov, M.J. Olah in D. Stefanovic, *Mechanism of diffusive transport in molecular spider models*, *Physical Review E* **83** (2011).
- [9] E.H.C. Bromley, idr., *The Tumbleweed: Towards a synthetic protein motor*, *HFSP Journal* **3** (2009), 204-212.
- [10] L.P. Faucheux, L.S. Bourdieu, P.D. Kaplan in A.J. Libchaber, *Optical Thermal Ratchet*, *Physical review letters* **74**, **9** (1995), 1504-1507.