

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Matematika – 1. stopnja

Ines Meršak

Problem londonskega stolpa

Delo diplomskega seminarja

Mentor: prof. dr. Sandi Klavžar

Ljubljana, 2016

KAZALO

1. Uvod	4
2. Osnovni pojmi teorije grafov	5
2.1. Povezanost grafa	8
2.2. Hamiltonovi grafi	8
2.3. Ravninski grafi	9
3. Klasični problem londonskega stolpa	12
4. Posplošeni londonski stolp	15
4.1. Definicija londonskega grafa	15
4.2. Oxfordski graf	16
4.3. Povezanost	19
4.4. Ravninskost	21
4.5. Simetrije londonskega stolpa	23
Slovar strokovnih izrazov	28
Literatura	29

Problem londonskega stolpa

POVZETEK

Problem londonskega stolpa je miselna uganka; dane imamo palice določenih višin, na katerih so razporejene krogle različnih barv. Cilj igre je s čim manj premiki krogel preiti iz začetnega stanja v neko končno (dano) stanje krogel. Za tak problem lahko narišemo graf, pri čemer so vozlišča stanja krogel, povezave pa veljavne poteze. V nalogi obravnavamo lastnosti tega grafa – najprej za klasični problem londonskega stolpa, kjer imamo 3 palice (višin 1, 2, 3) in 3 krogle različnih barv, nato pa še za splošen primer s p palicami in n krogli. Izkaže se, da je graf klasičnega problema ravninski in vsebuje Hamiltonovo pot, ni pa Hamiltonov. Pri splošnem primeru dokažemo, da je graf nekega problema londonskega stolpa povezan natanko tedaj, ko lahko krogle razporedimo tako, da najvišja palica ostane prazna. Prav tako ugotovimo, da so ravninski le grafi problemov z dvema krogli in nekateri grafi problemov s tremi krogli. V nalogi obravnavamo tudi poseben primer londonskega stolpa, pri katerem so vse palice enake višine n , imenovan oxfordski stolp. Za tak problem izpeljemo formulo za število vozlišč in povezav za poljubna n in p . Na koncu se dotaknemo tudi simetrij grafa nekega problema londonskega stolpa in na primeru demonstriramo, kako lahko z upoštevanjem teh simetrij bolj učinkovito določimo predvsem metričnih lastnosti teh grafov.

The Tower of London problem

ABSTRACT

The Tower of London is a problem-solving puzzle, which consists of pegs of various heights that hold different-coloured balls of the same size. The aim of the puzzle is to get from the beginning state of the balls to the given end state with as little moves as possible. In order to study this problem, we use graph theory: a graph of the problem, called the London graph, can be drawn. Here, the vertices of the graph are all possible states and the edges are valid moves between these states. In this work, we take a look at some of the properties of London graphs. First, we analyse the graph of the classical (Shallice's) version of the problem, which consists of 3 balls and 3 pegs (of heights 1, 2, 3, respectively), which turns out to be planar and contains a Hamiltonian path, but is not Hamiltonian. After that, we take a look at the graph of the generalized Tower of London with n balls and p pegs. We prove that such a graph is connected if and only if the balls can be rearranged in a way that the tallest peg remains empty. Furthermore, we find that only the problems with two balls (and some of those with three balls) have planar graphs. In this work, we also take a look at a special case of the Tower of London called the Tower of Oxford, where all the pegs are of the same height n . We prove an explicit formula to calculate the number of vertices and edges of the Oxford graph for all n and p . In the end, we touch upon the symmetries of the London graphs and demonstrate how we can take advantage of them in order to calculate some metric properties more efficiently.

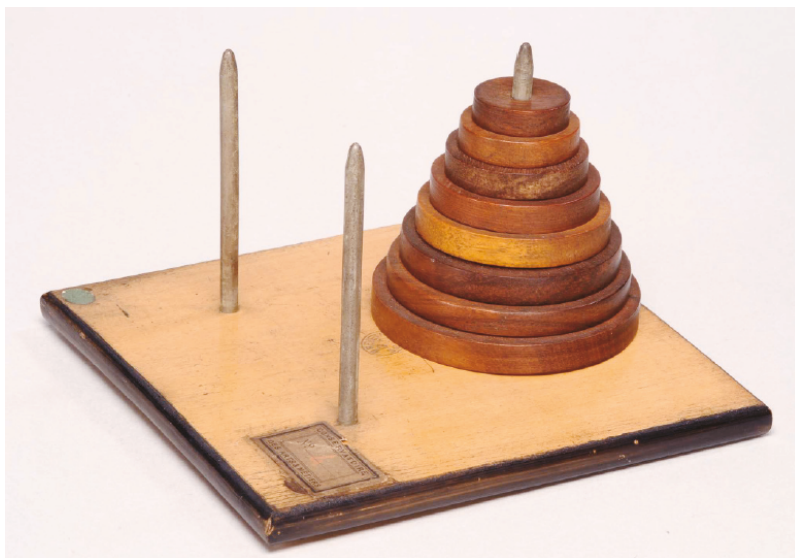
Math. Subj. Class. (2010): 05Cxx, 05E18

Ključne besede: klasični problem londonskega stolpa, londonski graf, oxfordski graf, ravninskost, povezanost, simetrije grafov

Keywords: Shallice's Tower of London, London graph, Oxford graph, planarity, connectedness, graph symmetries

1. UVOD

Test londonskega stolpa je ena izmed variacij igre hanojskega stolpa. Pri hanojskem stolpu imamo tri enako velike palice, pri čemer so na prvi palici postavljeni različno veliki diski (največji je na dnu palice, najmanjši pa na vrhu). Cilj igre je prestaviti ta stolp iz tako zloženih diskov na eno izmed drugih dveh palic, pri čemer lahko premikamo le en disk naenkrat in moramo upoštevati t. i. *božansko pravilo*: večjega diska ne smemo položiti nad manjši disk. To uganko je leta 1883 izumil Édouard Lucas in jo predvsem za namene trženja poimenoval po mestu Hanoj, katerega so leta 1882 zavzeli Francozi, leto kasneje pa so ga konstantno napadali kitajski vojaki, zato se je to mesto pogosto pojavljalo v novicah. Lucasova originalna verzija te igre je imela 8 diskov in je še danes ohranjena v muzeju v Parizu (prikazana je na sliki 1). Obstaja pa tudi legenda, ki govori o indijskem templju s



SLIKA 1. Originalna verzija hanojskega stolpa.

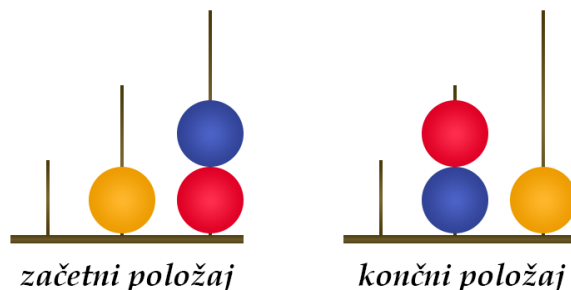
© Musée des arts et métiers–Cnam Paris / slika M. Favareille

tremi diamantnimi palicami, na eni izmed njih pa je kar 64 diskov; ta verzija uganke se imenuje brahminski stolp. Po legendi naj bi svečeniki dan in noč neutrudno premikali diske, in ko bodo stolp iz diskov v celoti uspeli prestaviti iz začetne palice na eno izmed preostalih dveh, se bo svet končal. Zaradi te zgodbe je hanojski stolp pogosto poimenovan tudi brahminski stolp.

Pri londonskem stolpu pa diske zamenjajo krogle, namesto božanskega pravila pa imamo naravno pravilo, da lahko kroglo položimo na neko palico le, če ta še ni polna (palice so pri tej uganke namreč različnih velikosti). Londonski stolp je izumil britanski nevropsiholog Tim Shallice leta 1982, predvsem za potrebe v psihologiji [6]. Na tem področju je zelo pogosto uporabljen še danes, predvsem v nevropsihologiji, saj s pomočjo te igre ugotavljajo stanje pacientove psihe, opazujejo pa lahko tudi napredek bolezni pri npr. Parkinsonovih ali pa Alzheimerjevih bolnikih; izguba sposobnosti načrtovanja in sposobnosti reševanja ugank je namreč eden izmed simptomov teh bolezni.

Osnovna verzija londonskega stolpa vsebuje tri enako velike krogle različnih barv in tri palice. Na prvo palico lahko postavimo samo eno kroglo, na drugo le dve krogli, na tretjo pa tri. Cilj igre je priti iz nekega danega stanja v neko drugo zeleno stanje

s čim manj koraki; primer nekega začetnega in končnega stanja pri osnovni verziji londonskega stolpa je prikazan na sliki 2. Zaradi vsestranske uporabnosti tega testa v psihologiji pa so bile kmalu po izumu osnovne verzije predstavljene njene različice, npr. londonski stolp s štirimi krogli in palicami višine 2, 3, 4.



SLIKA 2. Osnovna verzija uganke londonskega stolpa.

Diplomska naloga je razdeljena na tri dele: v prvem delu bomo najprej opisali vse pojme, navedli vse trditve, izreke in posledice teorije grafov, ki nam bodo v pomoč pri obravnavi problema londonskega stolpa, in nekatere tudi dokazali. V drugem delu bomo podrobneje opisali klasični londonski stolp in lastnosti pripadajočega grafa, v zadnjem delu pa bomo obravnavali posplošeni problem londonskega stolpa.

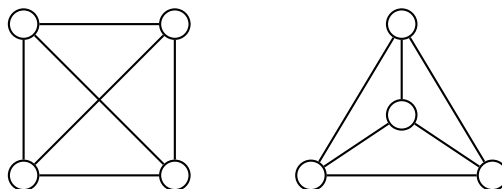
2. OSNOVNI POJMI TEORIJE GRAFOV

Vsa možna stanja londonskega stolpa in prehode med njimi lahko zelo elegantno opišemo s pomočjo grafov, zato si najprej pogledimo nekaj osnovnih pojmov teorije grafov.

Definicija 2.1. Graf G je urejen par $(V(G), E(G))$, kjer je $V(G)$ končna množica vozlišč, $E(G)$ pa množica povezav grafa. Povezave so predstavljene kot neurejeni pari vozlišč (neusmerjeni grafi).

Obstajajo variacije zgornje definicije, graf je lahko npr. usmerjen (povezave so urejeni pari) – tedaj govorimo o *digrafi*, ima neskončno število vozlišč ali pa več povezav med dvema vozliščema. Dopuščamo lahko tudi zanke: to je povezava oblike $\{v, v\}$, pri čemer je v vozlišče.

Vozlišča grafa predstavimo s točkami v ravnini, povezavo med dvema vozliščema pa kot enostavno krivuljo med ustreznima točkama v ravnini. Preslikavi, ki grafu priredi ustrezne točke in krivulje v ravnini, pravimo *risba grafa* (včasih pa s tem mislimo kar na predstavitev grafa v ravnini). Graf ima lahko več različnih možnih risb – razlikujejo se lahko npr. po tem, katere točke priredimo katerim vozliščem.



SLIKA 3. Možni predstavitvi nekega grafa v ravnini.

Če je $e = \{u, v\}$ povezava, tedaj sta u in v *krajišči* povezave e , pišemo tudi $e = uv$; rečemo, da sta u in v *sosednji vozlišči*.

Definicija 2.2. *Soseščina* vozlišča u je množica vseh sosednjih vozlišč vozlišča u :

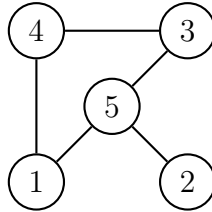
$$N(u) = \{x : ux \in E(G)\}.$$

Stopnja vozlišča u je število vseh vozlišč, ki so mu sosednji: $\deg u = |N(u)|$.

Primer 2.3. Naj bo graf G podan z

$$V(G) = \{1, 2, 3, 4, 5\}, \quad E(G) = \{\{1, 4\}, \{1, 5\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}\}.$$

Njegova risba je vidna na sliki 4.



SLIKA 4. Graf G .

Soseščina vozlišča 5 je $N(5) = \{1, 2, 3\}$. ◇

Če imamo podano stopnjo vseh vozlišč grafa, lahko na enostaven način izračunamo število povezav tega grafa:

Lema 2.4 (Lema o rokovanju). *Za vsak graf $G = (V(G), E(G))$ velja formula*

$$(1) \quad \sum_{u \in V(G)} \deg u = 2 \cdot |E(G)|.$$

Dokaz. Naredimo si tabelo vozlišč in povezav:

	...	e_j	...
\vdots		\vdots	
v_i	...	1 / 0	
\vdots			

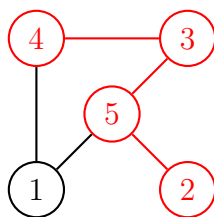
V prvem stolpcu so naštet vozlišča grafa, v prvi vrstici pa povezave. Na mestu i, j v tabeli zapišemo enico, če je vozlišče v_i eno izmed krajišč povezave e_j , in ničlo v nasprotnem primeru.

Vemo, da ima vsaka povezava dve krajišči, torej sta v vsakem stolpcu natanko dve enici. Če po drugi strani pogledamo število enic v neki vrstici i , nam to pove ravno stopnjo vozlišča v_i . Ker mora biti rezultat enak, če seštejemo ničle in enice po stolpcih oziroma po vrsticah, sledi formula (1). □

Definicija 2.5. Graf $H = (V(H), E(H))$ je *podgraf* grafa $G = (V(G), E(G))$, če velja

$$V(H) \subseteq V(G) \text{ in } E(H) \subseteq E(G).$$

Podgraf H grafa G je *inducirani* podgraf, če za vsaki dve vozlišči $x, y \in V(H)$ velja: $xy \in E(G) \implies xy \in E(H)$.



SLIKA 5. Graf H (označen z rdečo barvo) je induciran podgraf grafa G .

Primer 2.6. Če vzamemo graf G iz prejšnjega primera 2.3, potem je graf H , ki ima

$$V(H) = \{2, 3, 4, 5\}, \quad E(H) = \{\{2, 3\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}\}$$

induciran podgraf grafa G (prikazan je na sliki 5). \diamond

Poglejmo si nekaj razredov grafov, ki nam bodo prišli prav v kasnejših definicijah.

Pot na n vozliščih je graf, pri katerem vsa vozlišča postavimo v vrsto in zaporedna med seboj povežemo. Formalno pot na n vozliščih podamo takole:

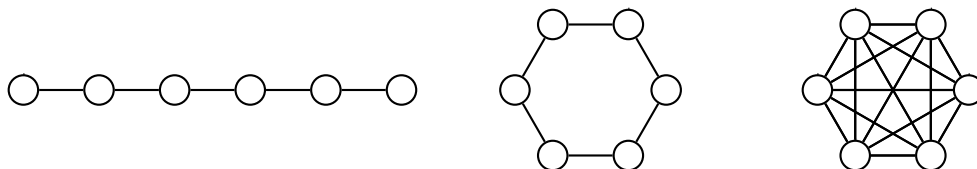
$$V(P_n) = \{v_i \mid i = 1, \dots, n\}, \quad E(P_n) = \{v_i v_{i+1} \mid i = 1, \dots, n-1\}.$$

Cikel na n vozliščih (označimo ga s C_n) je graf, ki ga dobimo iz poti na n vozliščih tako, da dodamo povezavo med vozliščema stopnje 1.

Polni graf na n vozliščih (označimo ga s K_n) je graf, za katerega velja

$$uv \in E(K_n) \quad \forall u, v \in V(K_n).$$

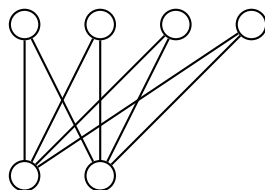
Z besedami, vsa vozlišča polnega grafa so med sabo povezana.



SLIKA 6. Primer poti (levo), cikla (sredina) in polnega grafa (desno) na šestih vozliščih.

Definicija 2.7. Graf G je *dvodelen*, če lahko množico njegovih vozlišč razbijemo na dva dela (V_1, V_2) tako, da ima vsaka povezava grafa G eno krajišče v V_1 in drugo v V_2 .

Pri polnem dvodelnem grafu z n vozlišči v prvi množici, recimo ji V_1 , in m vozlišči v drugi množici, recimo ji V_2 , je vsako vozlišče iz množice V_1 povezano z vsakim iz V_2 , medtem ko znotraj množic vozlišča niso povezana. Tak graf označimo s $K_{n,m}$.



SLIKA 7. Polni dvodelni graf $K_{2,4}$.

Definicija 2.8. Naj bosta $G = (V(G), E(G))$ in $H = (V(H), E(H))$ grafa. Preslikava $f: V(G) \rightarrow V(H)$ je *izomorfizem*, če je bijektivna in velja

$$uv \in E(G) \iff f(u)f(v) \in E(H), \quad \forall u, v \in V(G).$$

Grafa G in H sta *izomorfna*, če obstaja izomorfizem $G \rightarrow H$. Oznaka: $G \cong H$.

Pot v grafu G je podgraf grafa G , ki je izomorfen poti. *Cikel v grafu* G je podgraf grafa G , ki je izomorfen ciklu.

2.1. Povezanost grafa. *Sprehod* v grafu G je zaporedje vozlišč v_1, v_2, \dots, v_k , tako da velja $v_i v_{i+1} \in E(G)$, pri čemer je $1 \leq i \leq k-1$. Če označimo $x = x_1$ in $y = x_k$, potem takemu sprehodu rečemo x, y -sprehod.

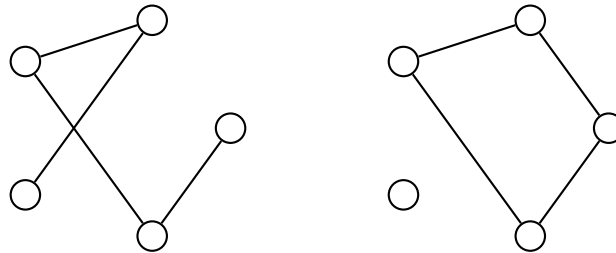
Sprehod je *enostaven*, če so vsa njegova vozlišča različna. Enostaven sprehod inducira podgraf, ki je izomorfen poti (torej pot v grafu).

Naj bo G graf in \sim relacija, definirana na kartezičnem produktu $V(G) \times V(G)$:

$$x \sim y \stackrel{\text{def}}{=} \exists x, y\text{-sprehod}.$$

Preprosto lahko preverimo, da je relacija \sim ekvivalenčna. Sledi, da relacija \sim množico vozlišč grafa G razbije na ekvivalenčne razrede. Podgrafi, inducirani s temi razredi, so *komponente* grafa G .

Definicija 2.9. Graf je *povezan*, če ima le eno komponento. Povedano drugače, za poljuben par vozlišč mora obstajati sprehod med njima.



SLIKA 8. Povezan graf (levo) in nepovezan graf (desno).

Če je G povezan graf, lahko definiramo *razdaljo* $d_G(u, v)$ med vozliščema u in v kot najmanjše možno število povezav na neki u, v -poti. Največjo možno razdaljo od danega vozlišča u do poljubnega vozlišča v grafu G imenujemo *ekscentričnost* vozlišča u .

Definirajmo še *premer* grafa kot največjo minimalno razdaljo med vsemi pari vozlišč. Enostavneje povedano to pomeni: če vzamemo poljubno vozlišče v grafu, potem lahko pridemo do drugega poljubnega vozlišča preko d ali manj povezav, kjer je d premer grafa.

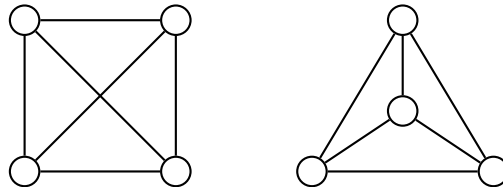
2.2. Hamiltonovi grafi. Eno izmed zanimivih vprašanj v teoriji grafov je, ali je možno najti neko pot/cikel v grafu, ki vsebuje vsa vozlišča tega grafa. S tem problemom se je ukvarjal tudi Hamilton, po katerem so take poti in cikli poimenovani; njega je zanimalo predvsem, ali je mogoče poiskati cikel, ki vsebuje vsa vozlišča, v dodekaedru [5].

Definicija 2.10. Pot v grafu, ki vsebuje vsa vozlišča tega grafa, se imenuje *Hamiltonova pot*. *Hamiltonov cikel* grafa G je cikel v G , ki poteka skozi vsa vozlišča tega grafa. Graf je *Hamiltonov*, če vsebuje Hamiltonov cikel.

2.3. Ravninski grafi. V nadaljevanju nas bo zanimalo tudi, kdaj je graf, s pomočjo katerega predstavimo londonski stolp, ravninski.

Definicija 2.11. Graf je *ravninski*, če ga lahko narišemo v ravnini tako, da se nobeni povezavi ne križata – torej če obstaja risba grafa, kjer se nobeni dve povezavi ne križata.

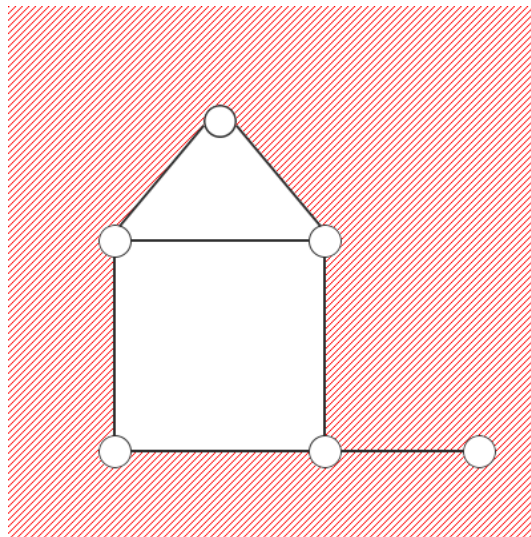
Če je graf narisani v ravnini brez križanj povezav, rečemo, da je graf *vložen v ravnino*.



SLIKA 9. Ravninskost grafa K_4 ni očitna.

Hitro lahko vidimo, da grafa K_5 in $K_{3,3}$ nista ravninska (poskusimo ju narisati v ravnini, a kmalu ugotovimo, da to ne bo mogoče). Videli bomo, da to dejstvo sledi tudi kot posledica ene izmed posledic Eulerjeve formule.

Spomnimo se, da je risba grafa predstavitev grafa v ravnini, pri čemer vozlišča ustrezajo točkam v ravnini, povezave pa enostavnim krivuljam med točkami. Te točke in enostavne krivulje lahko ravnino razdelijo na več delov – takim območjem pravimo *lica vložitve*. Lice, ki je neomejeno in obdaja celotno risbo grafa, je *zunanje*.



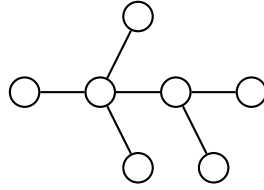
SLIKA 10. Zunanje lice grafa je označeno z rdečimi poševnimi črtami.

Izrek 2.12 (Eulerjeva formula). *Naj bo G povezan ravninski graf z n vozlišči in m povezavami. Naj ima risba grafa G , vloženega v ravnino, f lic. Potem velja*

$$n - m + f = 2.$$

Za dokaz Eulerjeve formule bomo potrebovali še definicijo drevesa:

Definicija 2.13. *Drevo* je povezan graf brez ciklov.



SLIKA 11. Drevo na 7 vozliščih.

Vidimo lahko, da risba drevesa premore le eno lice – zunanje.

Za vsako drevo z vsaj dvema vozliščema velja, da vsebuje vozlišče stopnje 1 – takemu vozlišču v drevesu pravimo *list* – saj bi v nasprotnem primeru graf vseboval neskončno pot ali cikel. Za drevesa velja tudi:

Lema 2.14. Če je T drevo z n vozlišči in m povezavami, je $m = n - 1$.

Dokaz. Lemo bomo dokazali z indukcijo na število vozlišč.

Baza indukcije: Če ima drevo le eno vozlišče, nima nobene povezave (velja $n = 1$, $m = 0 = n - 1$).

Indukcijska predpostavka: Drevo z $n - 1$ vozlišči ima $n - 2$ povezav.

Indukcijski korak: Vzamemo drevo z n vozlišči in m povezavami. Vemo ($n \geq 2$), da vsebuje vsaj en list – označimo ga z x . Če x odstranimo iz grafa, dobimo novo drevo z $n - 1$ vozlišči in $m - 1$ povezavami, saj je bilo vozlišče x stopnje 1. Po indukcijski predpostavki za novo drevo velja:

$$(m - 1) = (n - 1) - 1$$

$$m = n - 1.$$

□

Če želimo, da velja tudi obratno, pa moramo zahtevati še, da je graf povezan. Graf je torej drevo natanko tedaj, ko je povezan in je število njegovih povezav m enako $n - 1$. Dokaz tega dejstva je naveden v [3, str. 57].

Dokaz izreka 2.12. Formulo dokažemo z indukcijo na število povezav.

Naj bo $m = n - 1$. Imamo torej drevo, za katerega vemo, da njegova risba premore le zunanje lice, f je torej enak 1. Sledi

$$n - (n - 1) + 1 = 2.$$

Predpostavimo, da formula velja za vsak graf na n vozliščih in $m - 1$ povezavah.

Če sedaj vzamemo graf G z $m \geq n$ povezavami, graf torej vsebuje vsaj en cikel. Izberimo tak cikel v grafu, označimo ga s C , ki omejuje lice risbe, to lice označimo s F . Če iz grafa odstranimo eno od povezav e cikla C , nimamo več cikla, zato preostanek $C \setminus e$ ne omejuje več tega lica. Označimo $G' = G \setminus e$. G' ima še vedno $n' = n$ vozlišč, a eno povezavo in lice manj kot prej ($m' = m - 1$, $f' = f - 1$). Po indukcijski predpostavki sledi

$$n' - m' + f' = 2$$

$$n - (m - 1) + (f - 1) = 2$$

$$n - m + f = 2.$$

□

Naslednja posledica Eulerjeve formule nam bo pomagala pri dokazu dejstva, da grafa K_5 in $K_{3,3}$ nista ravninska.

Posledica 2.15. Če je G ravninski graf na n vozliščih in m povezavah, velja

$$(2) \quad m \leq 3n - 6.$$

Če G ne vsebuje trikotnikov, pa velja neenakost

$$(3) \quad m \leq 2n - 4.$$

Dokaz. Če za vsako lice upoštevamo le tri povezave (to je minimalno število povezav, ki omejujejo lice, ki ni zunanje), bomo dobili kvečjemu manj, kot če preštejemo vse povezave dvakrat. Vsaka povezava namreč omejuje največ dve lici; če bi po vseh licih sešteli število povezav, ki omejujejo neko lice, bi torej dobili dvakratno vrednost števila povezav. Torej velja neenakost

$$3f \leq 2m.$$

Če iz Eulerjeve formule izrazimo f in ga vstavimo v zgornjo neenakost, dobimo

$$3 \cdot (2 - n + m) \leq 2m$$

$$6 - 3n + 3m \leq 2m$$

$$m \leq 3n - 6.$$

Na podoben način pokažemo formulo (3), le da začnemo z neenakostjo

$$4f \leq 2m,$$

saj je zaradi predpostavke, da graf ne vsebuje trikotnikov, minimalno število povezav, ki omejuje lice, enako 4. \square

Z uporabo zgornje formule, ki torej mora veljati, če je graf ravninski, lahko dokažemo:

Posledica 2.16. K_5 in $K_{3,3}$ nista ravninska grafa.

Dokaz. Polni graf na petih vozliščih K_5 ima $\binom{5}{2} = 10$ povezav. Vrednost n je torej v tem primeru enaka 5, m pa je 10. Če bi bil K_5 ravninski, bi morala veljati formula (2), a temu ni tako:

$$10 = m \not\leq 3n - 6 = 9.$$

Torej K_5 ni ravninski.

Podobno lahko pokažemo tudi za poln dvodelni graf $K_{3,3}$, pri čemer je n enak 6, število povezav m pa 9. Če bi bil ta graf ravninski, bi morala veljati formula (3), a to ne drži:

$$9 = m \not\leq 2n - 4 = 8.$$

Graf $K_{3,3}$ torej ni ravninski. \square

Sedaj želimo ugotoviti, kakšnim pogojem mora ustrezati graf, da bo ravninski. Očitno velja naslednja trditev:

Trditev 2.17. Če je graf ravninski, potem je tudi vsak njegov podgraf ravninski.

Operacija "podgraf" torej ohranja ravninskost grafa. Pogledali si bomo še operacijo *subdivizije*, ki prav tako ohranja lastnost ravninskosti. Če vzamemo neko povezavo e grafa G in na sredino te povezave dodamo še eno vozlišče (v ravnini ga predstavlja točka), na tak način dobimo nov graf z operacijo subdivizije [3, str. 66].

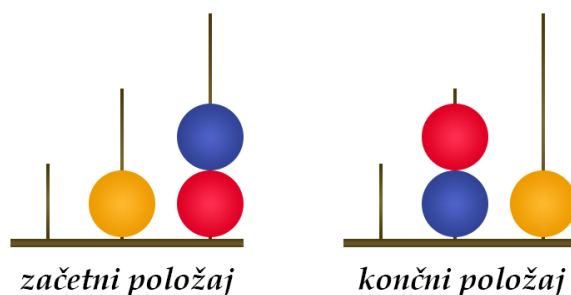
Definicija 2.18. Graf H je *subdivizija* grafa G , če ga lahko dobimo iz G z zaporednim subdiviziranjem povezav grafa G [3, str. 66].

Iz definicije je razvidno, da je tak H ravninski natanko tedaj, ko je G ravninski. Iz tega dejstva, trditve 2.17 in posledice 2.16 lahko zaključimo, da graf zagotovo ni ravninski, če vsebuje subdivizijo K_5 ali $K_{3,3}$. Zanimivo pa je, da velja tudi obratno; dokaz tega dejstva je netrivialen in ga lahko najdemo v [4, str. 247–251].

Izrek 2.19 (Kuratowski). *Graf G je ravninski natanko tedaj, ko ne vsebuje subdivizije K_5 niti subdivizije $K_{3,3}$.*

3. KLASIČNI PROBLEM LONDONSKEGA STOLPA

Pri klasičnem londonskem stolpu imamo tri enako velike krogle različnih barv in tri palice različnih velikosti: na prvo lahko postavimo eno kroglo, na drugo dve, na tretjo pa tri (temu bomo rekli, da imajo palice višine 1, 2 in 3). Cilj igre je priti iz nekega začetnega stanja v neko vnaprej določeno končno stanje.



SLIKA 12. Na sliki sta prikazani dve možni stanji londonskega stolpa.

Stanja in prehode med njimi si najlažje predstavljamo, če narišemo graf. V ta namen vpeljemo naslednje oznake: krogle bomo označili s številkami 1, 2, 3 – npr. modra krogla naj ima oznako 1, rdeča 2, rumena pa 3 – s simbolom “|” pa bomo označili konec prejšnje palice in začetek nove. Krogle bomo naštevali od vrha palice navzdol.

Primer 3.1. Začetno stanje na sliki 12 lahko torej opišemo z $|3|12$, končno stanje pa z $|21|3$. \diamond

S pomočjo teh oznak lahko opišemo vsako možno stanje in narišemo graf londonskega stolpa (označimo ga z L), pri čemer so vozlišča stanja, povezave pa so med tistimi stanji, med katerimi lahko prehajamo z eno potezo (enim veljavnim premikom krogle).

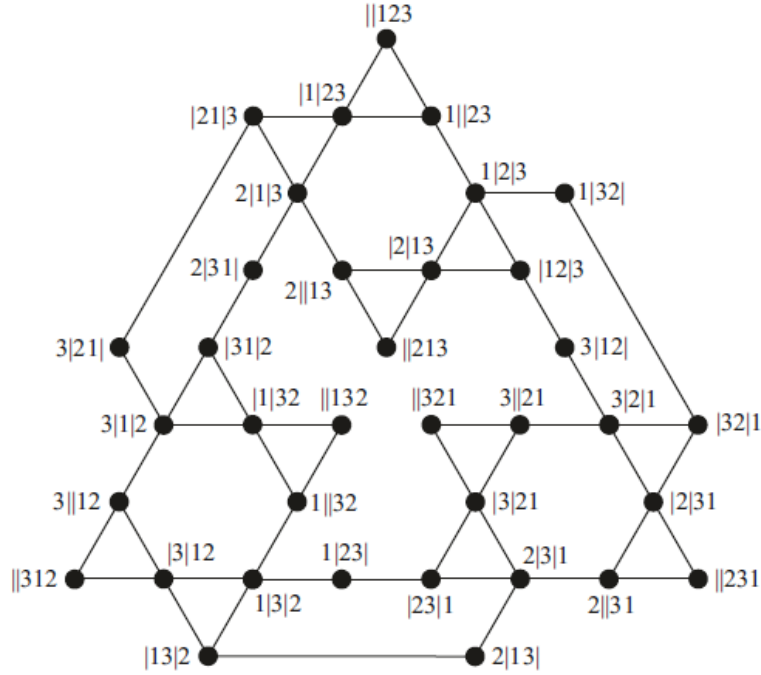
Lema 3.2. *Število vseh možnih stanj klasičnega londonskega stolpa je 36.*

Dokaz. Najprej si oglejmo vse možne postavitve krogel, pri čemer se ne oziramo na barvo. Imamo dve možnosti:

- (1) **Na prvi (najkrajši) palici je krogla.** Preostali dve krogli lahko razdelimo na drugi dve palici tako, da:
 - je prazna druga palica,
 - je prazna tretja palica,
 - ima vsaka palica po eno kroglo.

Torej imamo v tem primeru tri možnosti.

- (2) **Na prvi (najkrajši) palici ni krogle.** Na drugi dve palici moramo torej razdeliti vse tri krogle. Ponovno imamo tri možnosti:



SLIKA 13. Graf L klasičnega londonskega stolpa.

- druga palica je prazna, tretja palica pa polna (na njej so tri krogel),
- na drugi palici je ena krogla, na tretji palici pa dve krogli,
- druga palica je polna (na njej sta dve krogli), na tretji palici pa je ena krogla.

Po pravilu vsote imamo torej, če se ne oziramo na barve krogel, $3 + 3 = 6$ možnih postavitvev krogel. V vsaki od teh lahko še premešamo barve krogel, torej imamo za vsako postavitvev $3!$ možnosti. Sledi, da je vseh možnih stanj $3! \cdot 6 = 6 \cdot 6 = 36$. \square

Iz leme 3.2 sledi, da ima L 36 vozlišč. Graf je ravninski, saj je na sliki 13 narisana v ravnini brez križanj povezav. Hitro vidimo, da je 12 vozlišč grafa L stopnje 2, drugih 12 je stopnje 3, zadnjih 12 pa stopnje 4. Preverimo lahko tudi, da je premer klasičnega londonskega grafa enak 8.

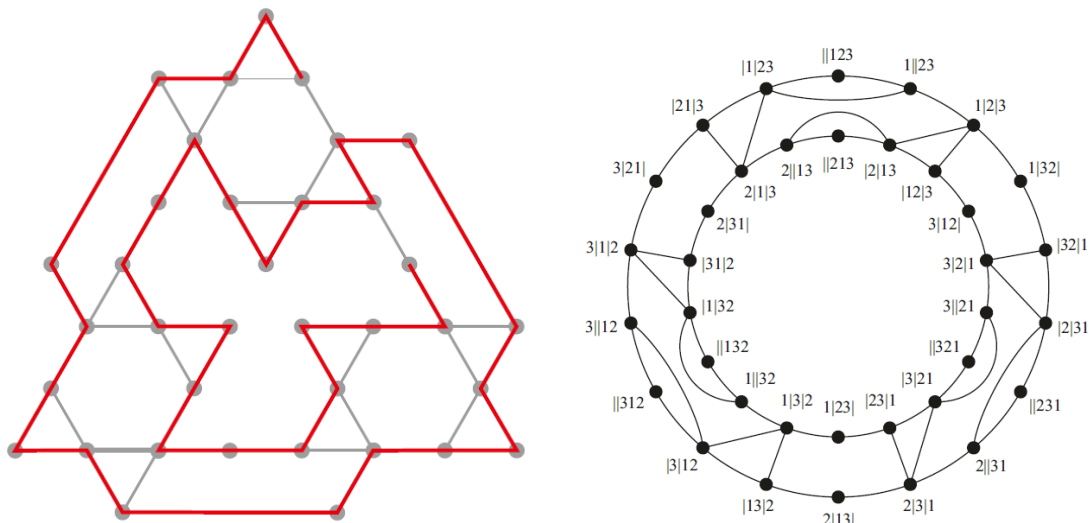
Primer 3.3. S pomočjo grafa na sliki 13 lahko hitro ugotovimo, da za prehod med stanjema $|3|12$ in $|21|3$, ki sta prikazani na sliki 12, potrebujemo minimalno 4 poteze in da obstaja le eno najkrajše možno zaporedje potez. \diamond

Trditev 3.4 ([2, Proposition 7.1.]). *Graf L vsebuje Hamiltonovo pot, ne pa tudi Hamiltonovega cikla.*

Dokaz. Hitro lahko dokažemo, da L vsebuje Hamiltonovo pot: poiščemo jo. Ena izmed Hamiltonovih poti v grafu L je prikazana na sliki 14 levo.

Da bi dokazali, da graf ni Hamiltonov, moramo najprej opaziti nekaj lastnosti tega grafa. Soseščina vsakega vozlišča stopnje 2 je sestavljena iz enega vozlišča stopnje 3 in enega stopnje 4, prav tako je presek soseščin poljubnih dveh vozlišč stopnje 2 prazen – vsako vozlišče stopnje 2 ima torej “svoje” vozlišče stopnje 3 in stopnje 4. Nadalje lahko iz grafa vidimo, da poljubni dve vozlišči stopnje 3 nista sosednji.

Sledi, da na ciklu C v grafu, ki bi vseboval vsa vozlišča, nobeni dve vozlišči stopnje 4 nista sosednji. Ker imamo po 12 vozlišč vsake stopnje, bi v nasprotnem primeru



SLIKA 14. Ena izmed Hamiltonovih poti v grafu L (levo) in graf L narisano malo drugače (desno).

namreč prišli do zaključka, da morata biti sosednji dve vozlišči stopnje 3, kar pa je v protislovju z zgornjim opažanjem.

Sedaj začnimo graditi cikel C , ki bo vseboval vsa vozlišča grafa natanko enkrat. Oglejmo si sliko 14 desno. Cikel C mora torej gotovo iti skozi vsa vozlišča stopnje 2, kar je možno le na en način: če imamo vozlišče stopnje 2 v s sosedoma u stopnje 3 in z stopnje 4, mora C vsebovati pot u, v, z . Če začnemo pri vozlišču stopnje 2 $||123$, mora graf torej vsebovati pot $1||23, ||123, |1|23$. Slednje je vozlišče stopnje 4, za nadaljevanje cikla pa imamo dve možnosti: vozlišče $2|1|3$ ali $|21|3$. Ker je prvo stopnje 4 in smo že prej opazili, da dve vozlišči enake stopnje ne bosta sosednji na ciklu C , cikel nadaljujemo z $|21|3$. Sosed tega vozlišča je vozlišče $3|21|$ stopnje 2, zato moramo cikel gotovo nadaljevati skozi njega. Pridemo do vozlišča $3|1|2$. Imamo dve možnosti:

- Nadaljujemo z vozliščem $|31|2$, ki je stopnje 3 in je na notranjem ciklu. V tem primeru ne bomo notranjega cikla nikoli zapustili, saj je notranji cikel oblike: vozlišče stopnje 2, vozlišče stopnje 3 (povezano samo z vozlišči na notranjem ciklu), vozlišče stopnje 4, ki je nato povezano z vozliščem stopnje 2, skozi katerega moramo iti. Nato pa sledita vozlišče a stopnje 3 (povezano z notranjim ciklom in vozliščem w stopnje 4 na zunanem ciklu) in vozlišče b stopnje 4 (povezan z vozliščem c stopnje 2 in še dvema drugima na notranjem ciklu ter vozliščem w). Ker moramo iti skozi vozlišče c , moramo tudi skozi b , od prej pa vemo, da moramo nujno tudi skozi a , saj je sosed vozlišča stopnje 2. Torej lahko pot speljemo le skozi a, b, c , saj je w stopnje 4 in na ciklu zato ne sme biti sosed b , ki je prav tako stopnje 4.
- Pot torej nadaljujemo z vozliščem stopnje 3 na zunanem ciklu $3||12$, in tudi v nadaljevanju ostanemo na zunanem ciklu, saj vemo, da bomo v nasprotnem primeru ostali na notranjem ciklu.

Ne moremo konstruirati cikla, ki bi vseboval vsa vozlišča našega grafa L natanko enkrat, L torej ni Hamiltonov. \square

4. POSPLOŠENI LONDONSKI STOLP

Graf klasičnega problema londonskega stolpa je majhen, zato je za psihološka testiranja naloga včasih prelahka. Jenny R. Tunstall je prva predlagala razširitev klasičnega londonskega stolpa na 4 krogle s podaljšanimi palicami (vsaka je podaljšana za eno enoto), mi pa si bomo v tem razdelku pogledali ta problem v splošnem, s $p \geq 3$ palicami in $n \geq 2$ krogli.

4.1. Definicija londonskega grafa. Posplošen londonski stolp ima $n \geq 2$ krogel, označimo jih s številkami $1, \dots, n$, in $p \geq 3$ palic, katerih višino označimo s h_k – toliko krogel lahko postavimo na k -to palico. Seveda velja, da mora biti število vseh krogel manjše ali enako vsoti višin vseh palic, sicer na palice ne moremo razporediti vseh krogel. S simboli zapišemo:

$$n \leq \sum_{k=1}^p h_k.$$

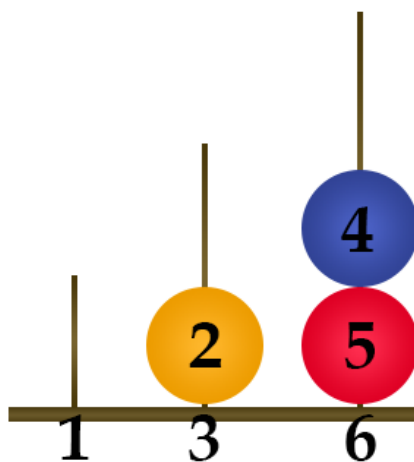
Edina omejitev premikov krogel je ponovno višina palic, prav tako je enak cilj igre: priti iz začetnega stanja v končno stanje s čim manj premiki.

Pred definicijo splošnega londonskega grafa vpeljimo oznake, ki jih bomo uporabljali za opis stanja nekega splošnega londonskega stolpa. Enoličen zapis lahko dosežemo, če vsako stanje predstavimo s permutacijo s iz simetrijske grupe S_{n+p} . Pri tem i -ta številka permutacije predstavlja

$$s_i = \begin{cases} \text{položaj krogle } i, & i \in [n] \\ \text{položaj dna palice } i - n, & i \in [n + p] \setminus [n] \end{cases}$$

Položaje oštevilčimo od leve palice proti desni, z vrha palice proti dnu. Tako bo s številko 1 oštevilčen položaj krogle, ki je postavljena najvišje na prvi palici; če na prvi palici ni nobene krogle, bo imelo položaj 1 dno te palice.

Primer 4.1. Poiščimo permutacijo za začetni položaj na sliki 12, ki smo ga označili z $|3|12|$. Predstavljajmo si, da oštevilčujemo krogle in dna palice, in začnimo oštevilčevati od leve proti desni, z vrha palice proti dnu, tako kot je prikazano na sliki 15.



SLIKA 15. Položaji krogel in palic za stanje $|3|12|$.

Sedaj le preberemo položaje vseh krogel (od prve do tretje) in vseh palic (od leve proti desni) – prva (modra) krogla je oštevilčena s 4, druga (rdeča) s 5, ... To stanje lahko torej predstavimo s permutacijo $s = 452136$. \diamond

Hitro vidimo, da mora veljati

$$\forall k \in [p]: s_{n+k} - s_{n+k-1} \geq 1,$$

saj je s_{n+k} položaj dna palice k , s_{n+k-1} pa položaj dna palice $k-1$, torej se mora njun položaj razlikovati najmanj za 1 – to se zgodi, če na palici k ni nobene krogel.

Prav tako pa velja tudi

$$\forall k \in [p]: s_{n+k} - s_{n+k-1} \leq h_k + 1,$$

kar se zgodi v primeru, če je na k -ti palici h_k krogel.

Opazimo še, da je položaj dna zadnje palice s_{n+p} vedno enak $n+p$, saj smo pred tem že oštevilčili položaje vseh n krogel in ostalih $p-1$ palic.

V splošnem je londonski graf, katerega vozlišča so vsa stanja pripadajočega londonskega stolpa, torej smiselno definirati takole:

Definicija 4.2. Za londonski graf L_h^n , kjer je $p \geq 3$, $n \geq 2$, $h \in [n]^p$, $\sum_{k=1}^p h_k \geq n$ velja:

- vozlišča so vse permutacije $s \in S_{n+p}$, za katere velja:

$$\forall k \in [p]: 1 \leq s_{n+k} - s_{n+k-1} \leq h_k + 1, \quad s_{n+p} = n+p,$$

- vsaki dve stanji (oz. pripadajoči permutaciji), med katerima lahko prehajamo z veljavno potezo, sta povezani.

S pogojem, da so vse palice visoke največ n , ne izgubimo splošnosti, saj razporejamo le n krogel.

Očitno je klasični londonski graf L enak L_{123}^3 , saj imamo 3 krogle in 3 palice, ki so velikosti 1, 2 in 3. Če smo za ta primer lahko izračunali število vozlišč, pa je v splošnem za londonske stolpe to precej težko. V naslednjem podrazdelku bomo obravnavali poseben primer londonskih grafov, za katerega je znana formula za število vozlišč.

4.2. Oxfordski graf. *Oxfordski graf* je poseben primer londonskega grafa, za katerega velja, da so vse palice velikosti n , pri čemer je n število krogel. Oxfordski graf označimo z O_p^n , zanj torej velja $O_p^n := L_{n^p}^n$.

Medtem ko je v splošnem težko določiti število vozlišč londonskega grafa, pa je to precej bolj preprosto za oxfordski graf. Še več, določimo lahko tudi število povezav.

Trditev 4.3 ([2, Exercise 7.3.]). Število vozlišč oxfordskega grafa O_p^n je enako

$$(4) \quad \frac{(n+p-1)!}{(p-1)!}.$$

Dokaz. Iščemo število vseh možnih stanj krogel oxfordskega stolpa, saj je to enako številu vozlišč oxfordskega grafa. Podobno kot pri dokazu števila stanj klasičnega londonskega stolpa najprej pozabimo na različne barve krogel (pretvarjamo se, da so krogle enake) in se osredotočimo samo na njihovo postavitev.

Na koliko načinov lahko n enakih krogel razporedimo na p palic višine n ? Pri tem nimamo nobenih omejitev, saj so palice dovolj visoke, da lahko vse krogle postavimo tudi na eno samo palico. Lahko si predstavljamo, da imamo vse krogle zložene v vrsto, označene naj bodo z 0, nato pa na poljubna mesta (s ponavljanjem) vrivamo

1, ki naj pomeni konec neke palice in začetek neke druge. Ko vrinemo $p - 1$ enic, smo določili p palic in s tem razporeditev krogel.

Sedaj lahko na problem pogledamo malo drugače: na $n + p - 1$ mest razporejamo n ničel, ki predstavljajo krogle, in $p - 1$ enic, ki predstavljajo začetek nove palice. Če razporedimo vse enice, bodo vsa preostala mesta zasedle ničle, razporeditev bo s tem točno določena. Načinov za izbiro $p - 1$ mest za enice izmed $n + p - 1$ položajev je $\binom{n+p-1}{p-1}$. Če privzamemo, da so vse krogle enake, je vseh možnih razporeditev torej $\binom{n+p-1}{p-1}$.

Ker je vsaka krogla drugačne barve, imamo za vsako razporeditev še $n!$ možnih permutacij barv. Število vseh stanj, in zato tudi število vozlišč, je tako enako

$$n! \cdot \binom{n+p-1}{p-1} = n! \cdot \frac{(n+p-1)!}{n!(p-1)!} = \frac{(n+p-1)!}{(p-1)!}. \quad \square$$

Trditev 4.4 ([2, Exercise 7.4.]). Število povezav oxfordskega grafa O_p^n je enako

$$(5) \quad \frac{np(p-2+n)!}{2(p-2)!}$$

Preden si ogledamo izpeljavo formule (5), pa si na hitro oglejmo še sledečo lemo, ki jo bomo potrebovali pri dokazu.

Lema 4.5. Velja naslednja lastnost binomskih simbolov:

$$(6) \quad \binom{b+w}{l} = \sum_{k=0}^l \binom{b}{k} \binom{w}{l-k}.$$

Dokaz. Formulo najlažje dokažemo kombinatorično. Predstavljajmo si, da imamo v posodi b črnih in w belih krogel, iz posode pa izbiramo l krogel.

Leva stran enakosti nam predstavlja vse možne načine izbire l krogel izmed $b + w$ krogel (brez vračanja).

Na to pa lahko gledamo tudi malo drugače: najprej določimo neko fiksno število k , toliko krogel bomo izbrali izmed črnih, preostanek pa bomo izbrali iz belih krogel. Za fiksno k je število možnih izbir ravno $\binom{b}{k} \binom{w}{l-k}$. Če to sedaj seštejemo po vseh možnih k -jih, bomo dobili ravno vse možne načine izbire l krogel izmed $b + w$ krogel, formula (6) torej velja. \square

Dokaz trditve 4.4. Vzemimo stanje (vozlišče) s q nepraznimi palicami, pri čemer je q fiksno ter velja $1 \leq q \leq p$ in $n \geq q$. Preštejmo vse veljavne poteze, ki jih lahko naredimo ob takem stanju krogel. Vsako vrhnjo kroglo ene izmed q palic lahko premaknemo na katerokoli palico, razen trenutne; izberemo torej eno izmed q palic, s katere premaknemo kroglo, in eno izmed preostalih $p - 1$ palic, kamor kroglo premaknemo. Tako vozlišče je torej stopnje $q(p - 1)$. (Pri tem upoštevamo, da je povezava med dvema vozliščema grafa pravzaprav veljavna poteza med dvema stanjema.)

Ugotovili smo, da so vsa stanja oziroma pripadajoča vozlišča, ki imajo točno q nepraznih palic, enake stopnje. Ker želimo uporabiti lemo o rokovanju, moramo najprej prešteti, koliko je takih stanj. Izberemo q izmed p palic, ki bodo neprazne, kar lahko storimo na $\binom{p}{q}$ načinov. Na vsako izmed teh q palic moramo nujno postaviti vsaj eno kroglo, kar lahko naredimo na $n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot (n-q+1) = \frac{n!}{(n-q)!}$ (za prvo izmed

q palic imamo na voljo n krogel, za drugo $n - 1$ krogel, ...). S tem zagotovimo, da je točno q palic res nepraznih. Preostalih $n - q$ krogel pa lahko razporedimo poljubno na q palic, kar je brez škode za splošnost enako številu razporeditev $n - q$ krogel na q palic velikosti $n - q$, torej $|V(O_q^{n-q})|$. Iz tega razmisleka sledi, da je število vseh stanj, ki imajo točno q nepraznih palic, torej enako

$$\binom{p}{q} \frac{n!}{(n-q)!} \cdot |V(O_q^{n-q})|.$$

Če uporabimo še formulo za število vozlišč oxfordskega grafa (4) in poračunamo, dobimo, da je število takih stanj enako

$$\begin{aligned} \binom{p}{q} \frac{n!}{(n-q)!} \cdot |V(O_q^{n-q})| &= \binom{p}{q} \frac{n!}{(n-q)!} \frac{(n-q+q-1)!}{(q-1)!} \\ &= n! \binom{p}{q} \frac{(n-1)!}{(q-1)! (n-q)!} \\ &= n! \binom{p}{q} \binom{n-1}{q-1}. \end{aligned}$$

Sedaj po q seštejemo stopnje vseh vozlišč (upoštevamo, da imajo vsa vozlišča, kjer je nepraznih točno q palic, enako stopnjo) in uporabimo formulo (1) iz leme o rokovanju:

$$\begin{aligned} |E(O_p^n)| &= \frac{1}{2} \sum_{q=1}^p \overbrace{q(p-1)}^{\text{stopnja vozlišča}} \overbrace{n! \binom{p}{q} \binom{n-1}{q-1}}^{\text{št. vozlišč s to stopnjo}} \\ &= \frac{1}{2} (p-1) n! \sum_{q=1}^p q \binom{p}{q} \binom{n-1}{q-1} \\ &= \frac{1}{2} (p-1) n! \sum_{q=1}^p q \frac{p!}{q! (p-q)!} \binom{n-1}{q-1} \\ &= \frac{1}{2} (p-1) n! \sum_{q=1}^p p \frac{(p-1)!}{(q-1)! (p-q)!} \binom{n-1}{q-1} \\ &= \frac{1}{2} p(p-1) n! \sum_{q=1}^p \binom{p-1}{q-1} \binom{n-1}{q-1}. \end{aligned}$$

Sedaj uvedemo nov indeks $k = q - 1$, upoštevamo lastnosti binomskih simbolov in uporabimo zgoraj dokazano formulo (6):

$$\begin{aligned} |E(O_p^n)| &= \frac{1}{2} p(p-1) n! \sum_{k=0}^{p-1} \binom{p-1}{k} \binom{n-1}{k} \\ &= \frac{1}{2} p(p-1) n! \sum_{k=0}^{p-1} \binom{p-1}{p-1-k} \binom{n-1}{k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2}p(p-1)n! \binom{p-1+n-1}{p-1} \\
&= \frac{1}{2}p(p-1)n! \binom{n+p-2}{p-1} \\
&= \frac{1}{2}p(p-1)n! \frac{(n+p-2)!}{(p-1)!(n-1)!} \\
&= \frac{1}{2}pn \frac{(n+p-2)!}{(p-2)!} \\
&= \frac{np}{2} \frac{(p-2+n)!}{(p-2)!}.
\end{aligned}$$

□

4.3. Povezanost. Zaželjeno je, da lahko pri londonskem stolpu, s pomočjo katerega opravljajo teste v psihologiji, prehajamo med poljubnima dvema stanjema. To velja, če je pripadajoči londonski graf povezan, kar je zato ena pomembnejših lastnosti tega grafa. V nadaljevanju bomo privzeli, da so palice urejene po velikosti naraščajoče, velja torej $h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_p$. Potreben pogoj za povezanost londonskega grafa je očitno

$$n \leq \sum_{k=1}^{p-1} h_k,$$

oziroma z besedami, da lahko krogel razporedimo tako, da najvišja palica ostane prazna. V nasprotnem primeru bi, potem ko bi razporedili maksimalno možno število krogel na vse preostale (manjše) palice, na največji ostalo še nekaj krogel, ki jih nikoli ne bi mogli premakniti na kakšno drugo palico. Izkaže se, da je ta pogoj tudi zadosten za povezanost londonskega grafa.

Izrek 4.6 ([2, Theorem 7.3.]). *Londonski graf L_h^n je povezan natanko tedaj, ko velja pogoj*

$$(7) \quad n \leq \sum_{k=1}^{p-1} h_k.$$

Dokaz. Želimo dokazati, da iz pogoja (7) sledi, da lahko najdemo pot med poljubnima dvema vozliščema v londonskem grafu, kar je ravno definicija povezanosti. Dokaza se lotimo tako, da najprej čim bolj zreduciramo splošen problem in nato rešimo zreduciran problem.

Spomnimo se, da vsako vozlišče londonskega grafa predstavlja neko stanje krogel – če torej iščemo pot v grafu med dvema vozliščema, pravzaprav rešujemo problem, kako iz začetnega stanja krogel priti v končno. Fiksirajmo poljubno začetno in končno stanje in poskusimo rešiti ta problem.

Predpostavili bomo, da je število vseh krogel kar enako vsoti višin vseh palic brez največje, saj lahko v nasprotnem primeru vpeljemo navidezne krogel, katerih premike kasneje zanemarimo. Velja naj torej $n = \sum_{k=1}^{p-1} h_k$.

Nadalje lahko predpostavimo, da so krogel pri začetnem kot tudi pri končnem stanju razporejene tako, da je največja palica prazna. V nasprotnem primeru jih lahko na začetku razporedimo na preostale palice, na koncu pa preprosto prestavimo na največjo palico.

Torej je za dokaz povezanosti grafa dovolj, če najdemo pot med poljubnima dvema stanjema, pri katerem so vse palice (razen največje) zapolnjene, največja palica pa je prazna.

Sedaj postopamo tako, da izberemo kroglo, ki še ni na svojem (končnem) položaju, in jo zamenjamo s kroglo, ki se trenutno nahaja na tem položaju; ta postopek ponavljamo. Če lahko zamenjavo naredimo tako, da se pri tem ne spremeni položaj nobene druge krogle, je po koncu zamenjave še ena krogla več na pravem mestu. Ker je največja palica prazna, vse druge pa zapolnjene, se po koncu ponavljanja tega postopka ne more zgoditi, da je le ena krogla (označimo jo z a) na napačnem mestu. V nasprotnem primeru bi zaradi zapolnjenosti palic namreč obstajala krogla b , ki bi bila na končnem mestu krogle a in zato b ne bi bila na svojem končnem položaju – torej imamo vedno vsaj dve krogli, ki sta na napačnem mestu, ti dve krogli pa lahko spet zamenjamo.

Če torej dokažemo, da lahko poljubni dve krogli zamenjamo tako, da se pri tem ne spremeni položaj nobene druge krogle, bomo s ponavljanjem zgornjega postopka lahko prešli iz začetnega v končno stanje krogel, graf bo povezan.

Sedaj predpostavimo še, da je ena izmed krogel, ki ju bomo zamenjali, na vrhu prve, najmanjše, palice. Namreč, s tremi zamenjavami, pri katerih je ena izmed krogel vedno na vrhu prve palice, lahko nadomestimo splošno zamenjavo dveh poljubnih krogel. Recimo, da želimo zamenjati poljubni krogli a in b . Če uporabimo notacijo klasičnega problema, s c označimo vrhnjo kroglo prve palice, z x pa poljubno število nekih poljubnih krogel in če izpustimo palice, ki na to menjavo ne bodo imele vpliva, lahko menjavo a in b opravimo takole:

$$cx|ax|xbx| \rightarrow bx|ax|xcx| \rightarrow ax|xbx|xcx| \rightarrow cx|xbx|ax|.$$

Pri tem je bila v vsaki menjavi udeležena vrhnja krogla prve palice. Dovolj je torej dokazati, da lahko naredimo menjavo vrhnje krogle prve palice in neke druge poljubne krogle, brez da bi pri tem pokvarili položaj ostalih krogel.

Sedaj si izberimo kroglo, ki ni na pravem položaju, in s tem tudi kroglo, ki je trenutno na njenem položaju. Predpostavili smo, da je ena izmed teh krogel na prvi palici – to kroglo označimo z a , drugo pa z b . Ločimo dva primera:

- (1) **Krogla b je na prvi palici.** Vrhno kroglo druge palice, označimo jo s c , premaknemo na največjo (p -to) palico. Nato kroglo a premaknemo na vrh druge palice, preostale krogle na prvi palici z do vključno kroglo b pa premaknemo (seveda eno naenkrat) na največjo palico. Krogla a lahko sedaj zasede svoj pravi položaj na prvi palici, b pa premaknemo iz vrha največje palice na vrh druge. Sedaj lahko vrnemo vse preostale krogle (razen c) na prejšnje mesto na prvi palici, nato lahko na vrh prve palice postavimo b , ki tako zavzame prejšnji položaj krogle a . Za konec premaknemo še kroglo c z največje palice na vrh druge palice.
- (2) **Krogla b ni na prvi palici.** V tem primeru je postopek še nekoliko lažji: najprej vse krogle nad b premaknemo na največjo palico, nato na vrh največje palice premaknemo tudi b . Sedaj lahko kroglo a prestavimo na njeno pravo mesto (kjer je bil prej b), b na vrh prve palice, vse preostale krogle na največji palici pa postavimo nazaj na prejšnja mesta, nad kroglo a .

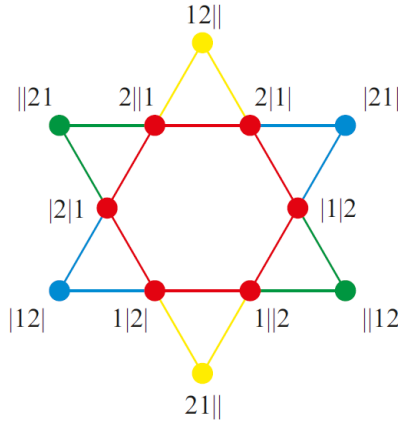
S tem je dokaz končan, saj smo našli način, kako prehajati med dvema poljubnima stanjema krogel, in smo s tem našli tudi pot v grafu med poljubnima vozliščema. \square

4.4. Ravninskost. Omenili smo že, da se problem londonskega stolpa pogosto uporablja kot psihološki test. Psihologi rezultate testov radi prikažejo kar na grafu uporabljenega problema, zato je zanimivo tudi vprašanje ravninskosti londonskih grafov – križanje povezav namreč lahko vodi do zmede pri prikazu rezultatov. Ker se za testiranje uporablja le londonski stolp s tremi palicami, se bomo tudi pri obravnavi ravninskosti omejili na ta primer, torej naj bo $p = 3$.

Najprej obravnavajmo primer londonskega stolpa z dvema krogla ($n = 2$, to so torej grafi L_h^2). V tem primeru imamo grafe $L_{111}^2, L_{112}^2, L_{122}^2$ in $L_{222}^2 = O_3^2$ (še vedno predpostavljamo, da so palice razvrščene po velikosti naraščajoče). Hitro lahko vidimo, da je npr. L_{111}^2 podgraf L_{112}^2 : iz prvega lahko pridemo do drugega tako, da dodamo vozlišči, kjer sta obe krogli na največji palici, in ustrezno dodamo povezave z že obstoječimi stanji. Če $s \subset$ označimo relacijo podgraf, lahko vidimo sledeče:

$$L_{111}^2 \subset L_{112}^2 \subset L_{122}^2 \subset L_{222}^2 = O_3^2.$$

S slike 16, na kateri je narisani graf O_3^2 , lahko zaključimo, da je ta graf ravninski. Iz tega seveda sledi, da so ravninski tudi vsi njegovi podgrafi, saj z brisanjem vozlišč in povezav ne moremo ustvariti križanj povezav. Torej so vsi londonski grafi za $n = 2$ in $p = 3$ ravninski. Na sliki 16 so pravzaprav prikazani grafi vseh londonskih stolpov z dvema krogla – rdeča barva označuje najmanjši graf, L_{111}^2 , nato pa z zaporednim dodajanjem vozlišč in povezav dobimo še ostale: če dodamo zelena vozlišča, dobimo L_{112}^2 , če nato dodamo še modra vozlišča, dobimo L_{122}^2 ; celoten graf pa (kot že omenjeno) predstavlja O_3^2 .



SLIKA 16. Vsi londonski grafi s $p = 3$ in $n = 2$ so ravninski.

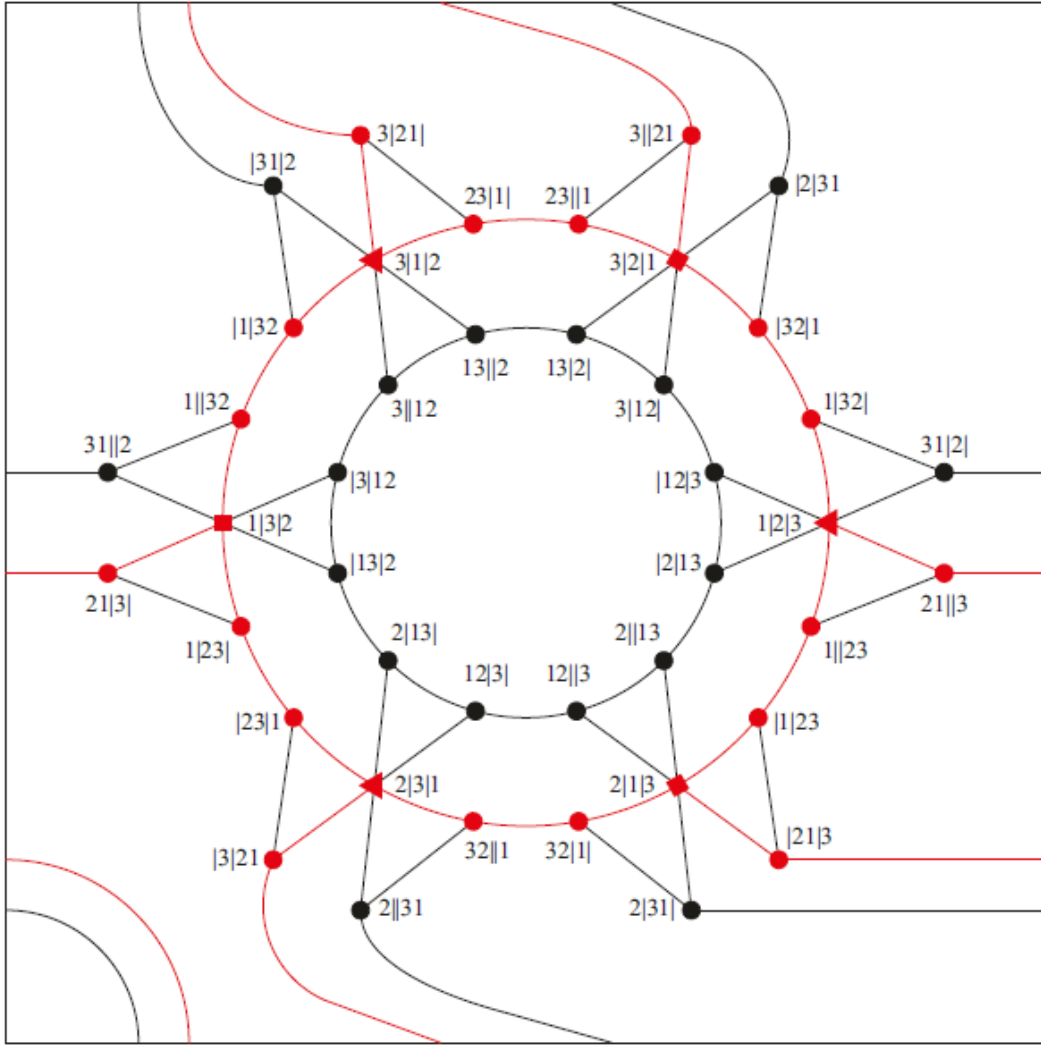
Če si sedaj pogledamo problem londonskega stolpa s tremi krogli ($n = 3$), na podoben način kot za dve krogli dobimo sledečo shemo:

$$(8) \quad \begin{array}{ccccccc} & & L & & & & \\ & & \parallel & & & & \\ L_{122}^3 & \subset & L_{123}^3 & \subset & L_{133}^3 & & \\ \cap & & \cap & & \cap & & \\ L_{222}^3 & \subset & L_{223}^3 & \subset & L_{233}^3 & \subset & L_{333}^3 \\ & & & & & & \parallel \\ & & & & & & O_3^3 \end{array}$$

Trditev 4.7 ([2, Proposition 7.4.]). *Naj bo $p = 3$. Tedaj so ravninski londonski grafi natanko grafi $L_h^2, L_{122}^3, L_{123}^3$ in L_{133}^3 .*

Dokaz. Videli smo že, da so grafi $L_h^2, L_{122}^3, L_{123}^3$ in L_{133}^3 ravninski. Dokazati moramo, da vsi ostali grafi za $n = 3$ in vsi grafi za $n \geq 4$ niso ravninski. Pri tem nam bo v pomoč izrek 2.19, ki pravi, da je graf ravninski natanko tedaj, ko ne vsebuje subdivizije K_5 ali $K_{3,3}$. V grafu L_{222}^3 pa lahko najdemo subdivizijo $K_{3,3}$, ki je na sliki 18 prikazana z rdečo barvo. Iz tega po izreku 2.19 sledi, da L_{222}^3 ni ravninski. Ker vsi preostali grafi z $n = 3$ vsebujejo graf L_{222}^3 (kot lahko vidimo na shemi (8)), tudi $L_{223}^3, L_{233}^3, L_{333}^3 = O_3^3$ niso ravninski.

22



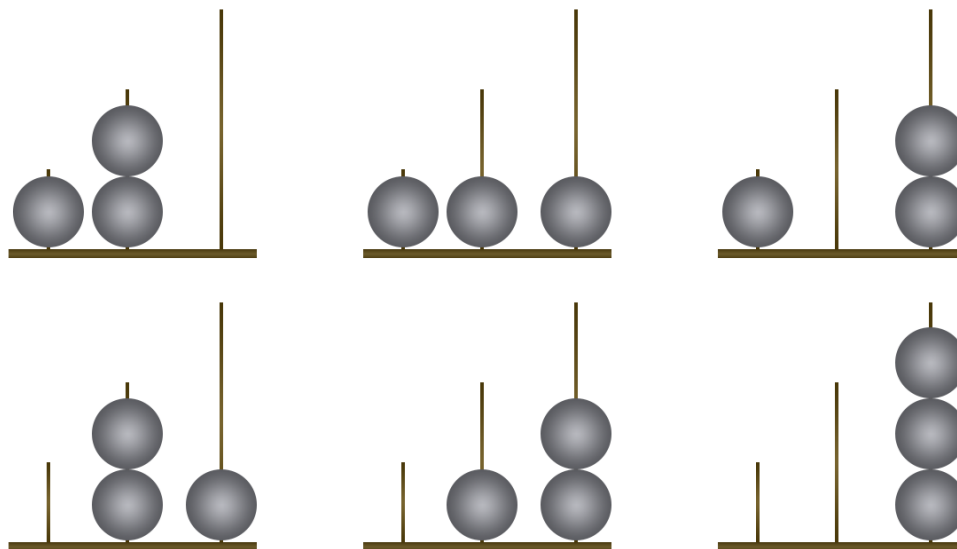
SLIKA 18. Graf L_{222}^3 vsebuje subdivizijo $K_{3,3}$.

vsak graf L_h^4 vsebovati ali L_{133}^4 ali L_{222}^4 , ki nista ravninska, to sledi tudi za preostale grafe z $n = 4$.

Za $n \geq 4$ torej noben graf ni ravninski, saj vsak L_h^n dobimo z dodajanjem krogel enemu izmed L_h^4 , za katere pa zdaj vemo, da niso ravninski. \square

4.5. Simetrije londonskega stolpa. Zamislimo si za trenutek problem londonskega stolpa, pri katerem so vse palice različne višine. Simetrije pripadajočega grafa so ravno vse možne permutacije barv krogel. Če pa pri našem problemu obstaja nekaj palic, ki so enake višine, pa so simetrije grafa tudi permutacije palic enake višine. V temu poglavju bomo najprej omenili simetrije klasičnega problema londonskega stolpa, nato pa preučili še simetrije nekaterih ostalih problemov s tremi palicami, z uporabo simetrijskih lastnosti pa bomo potem sklepali nekaj več o lastnostih pripadajočih grafov.

Pri klasičnem problemu londonskega stolpa imamo 3 palice različnih višin, torej so edine možne simetrije permutacije barv krogel. Izračunali smo že, da je število vseh možnih stanj krogel za ta primer enak 36, pri tem pa vemo, da imamo zaradi treh krogel $3! = 6$ možnih barvnih permutacij. Med temi 36 stanji je torej pravzaprav



SLIKA 19. Na slikah so prikazane vse možne geometrijske razporeditve krogel za klasični problem L_{123}^3 .

le 6 različnih geometrijskih razporeditev krogel (neupoštevajoč barve), vsaka izmed teh razporeditev pa ima potem še 6 permutacij barv krogel.

Spomnimo se, da je naloga pri problemu londonskega stolpa sestavljena iz začetnega in končnega stanja krogel, matematično jo torej lahko opišemo kot urejen par dveh možnih stanj. Ker ima klasični problem 36 možnih stanj, je število vseh nalog enako $36 \cdot 35$. Razdelimo jih lahko v 6 blokov glede na barvno permutacijo, ki jim pripada – če ne upoštevamo barv, imamo tako na voljo le 210 različnih nalog, vsaka izmed njih je predstavnik enega ekvivalenčnega razreda na množici vseh nalog glede na permutacije barv krogle. Vsak tak ekvivalenčni razred je velikosti 6, saj imamo toliko možnih barvnih permutacij. Rešitve nalog, ki spadajo v isti ekvivalenčni razred (“izo-naloge”), so sestavljene iz enakih potez; razlikujejo se le v barvah krogel, ki jih premikamo [1, str. 591].

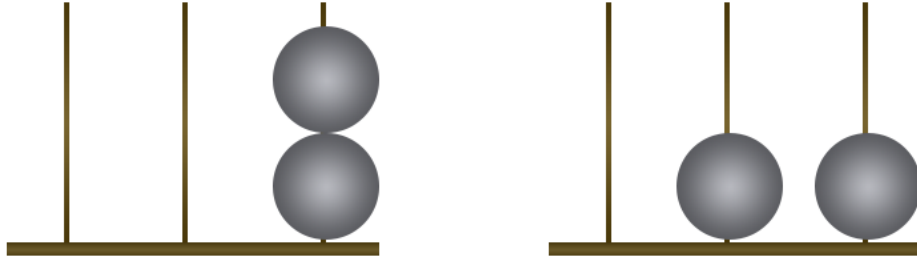
Opomba 4.9. Matematično gledano so vse naloge, ki so del istega ekvivalenčnega razreda, enako težke. Ni pa nujno, da jih tako dojema tudi oseba, ki nalogo rešuje.

Problem pa postane še bolj zanimiv, če imamo (za razliko od klasičnega londonskega grafa) poleg barvnih permutacij na voljo tudi permutacije palic. Demonstrirajmo, kako lahko z upoštevanjem simetrij bolj učinkovito preučimo predvsem metrične lastnosti nekega grafa. Za začetek si le kot primer oglejmo oxfordski graf O_2^3 , pri čemer bomo izpustili dokaze za nekatera dejstva, kasneje pa bomo izpeljali vso teorijo, potrebno za celovit dokaz, in s pomočjo te teorije preučili malo večji graf L_{222}^3 .

Ce upoštevamo simetrije krogel in palic, imamo pri problemu O_2^3 pravzaprav le dve razporeditvi krogel, ki nista ekvivalentni, in sicer:

- obe krogli sta na isti palici (prikazano na sliki 20 levo),
- krogli nista na isti palici (prikazano na sliki 20 desno).

Množica stanj tega problema torej razpade na dva ekvivalenčna razreda. Če za vsako izmed teh stanj upoštevamo vse možne simetrije (na voljo imamo $3!$ permutacij palic in 2 permutaciji barv), vidimo, da sta oba ekvivalenčna razreda velikosti 6,



SLIKA 20. Na sliki sta prikazani edini dve neekvivalentni stanji problema O_3^2 .

saj z nekaterimi izbirami permutacije za palice in barvi dobimo enako razporeditev krogel. Sedaj lahko npr. povprečno ekscentričnost vozlišč izračunamo tako, da ugotovimo ekscentričnost nekega predstavnika teh dveh ekvivalenčnih razredov, recimo $\epsilon(12||) = 4$ in $\epsilon(1|2|) = 3$, iz česar lahko sklepamo, da je povprečna ekscentričnost v grafu enaka $\bar{\epsilon}(O_3^2) = 3.5$. Na podoben način lahko izračunamo tudi povprečno razdaljo med dvema vozliščema v grafu tako, da najprej seštejemo vse razdalje od nekega poljubnega vozlišča do teh dveh predstavnikov, nato pa upoštevamo velikosti obeh ekvivalenčnih razredov in koliko je vseh možnih parov vozlišč (število vozlišč tega grafa lahko izračunamo po formuli (4) in je enako 12):

$$\sum_{s \in V(O_3^2)} d(12||, s) = 26, \quad \sum_{s \in V(O_3^2)} d(1|2|, s) = 21 \implies \bar{d}(O_3^2) = \frac{6 \cdot 26 + 6 \cdot 21}{144} \approx 1.958.$$

Za učinkovitejšo preučevanje simetrij večjih londonskih grafov definirajmo grupo $(\Gamma_{np}, \cdot, 1_{np})$, pri čemer velja $\Gamma_{np} = S_n \times S_p$; grupa S_n bo pri tem predstavljala vse možne permutacije (barv) krogel, S_p pa vse možne permutacije palic. Operacijo \cdot definiramo takole:

$$(\chi_1, \pi_1) \cdot (\chi_2, \pi_2) = (\chi_1 \circ \chi_2, \pi_1 \circ \pi_2),$$

enota pa je kar urejen par enot grupe S_n (označimo jo z id_n) in S_p (označimo jo z id_p), velja torej $1_{np} = (\text{id}_n, \text{id}_p)$. Enostavno lahko preverimo, da za tako definirano operacijo \cdot in enoto 1_{np} res dobimo grupo. Seveda velja, da je velikost naše grupe simetrij $|\Gamma_{np}|$ enaka kar produktu velikosti množic S_n in S_p , torej $|\Gamma_{np}| = n! \cdot p!$.

Sedaj lahko definiramo delovanje te grupe na množici vozlišč (stanj) nekega londonskega grafa $V(L_h^n)$. Označimo neko stanje krogel z $s = \Sigma_1 | \dots | \Sigma_p$, kjer $|$ ponovno označuje začetek naslednje palice, Σ_i pa je niz, sestavljen iz oznak krogel na i -ti palici; krogle kot ponavadi naštevamo od vrha palice navzdol. Grupa Γ_{np} sedaj deluje na poljubno stanje s iz množice vozlišč takole:

$$(\chi, \pi) \cdot s = X(\Sigma_{\pi^{-1}(1)} | \dots | \Sigma_{\pi^{-1}(p)}),$$

pri čemer je X preslikava, ki ustrezno permutira barve krogel glede na χ . To je res delovanje, saj očitno velja $1_{np} \cdot s = s$ za vsak $s \in V(L_h^n)$, enostavno pa lahko preverimo, da velja tudi

$$((\chi_1, \pi_1) \cdot (\chi_2, \pi_2)) \cdot s = (\chi_1, \pi_1) \cdot ((\chi_2, \pi_2) \cdot s).$$

Iz osnovne teorije grup vemo, da lahko na množici stanj definiramo ekvivalenčno relacijo \sim takole:

$$s_1 \sim s_2 \iff \exists(\chi, \pi) \in \Gamma_{np}: s_2 = (\chi, \pi).s_1,$$

množica stanj razpade na ekvivalenčne razrede, ki so kar orbite. Ekvivalentna so torej tista stanja krogel, ki so v isti orbiti.

Analogno lahko definiramo delovanje Γ_{np} tudi na množici vseh nalog za nek problem, torej na $V(L_h^n) \dot{\times} V(L_h^n)$, pri čemer je operator $\dot{\times}$ definiran takole:

$$A \dot{\times} A = \{(a, b) \in A \times A \mid a \neq b\}.$$

Primer 4.10. Vzemimo oxfordski graf O_3^2 in pokažimo, da sta nalogi $2||1 \rightarrow |1|2$ in $|2|1 \rightarrow 2|1|$ ekvivalentni. Želimo poiskati par permutacij (χ, π) , ki nam bo prvi dve stanji krogel preslikal v drugi dve; permutaciji bomo zapisali z disjunktными cikli. Če vzamemo $(\chi, \pi) = ((1\ 2), (3\ 2\ 1))$ in upoštevamo, da je $\pi^{-1} = (1\ 2\ 3)$, se nam prva naloga preslika v $X(|1|2) \rightarrow X(1|2) = |2|1 \rightarrow 2|1|$, dobimo drugo nalogo, torej sta nalogi res v isti orbiti. \diamond

S pomočjo zgornje teorije lahko sedaj dokažemo naslednjo trditev za londonski graf L_{222}^3 :

Trditev 4.11 ([2, Proposition 7.5.]). *Množica stanj londonskega grafa L_{222}^3 , katere velikost je 42, razpade v 2 ekvivalenčna razreda; prvi je velikosti 6, drugi pa 36. Minimalna stopnja vozlišč tega grafa je 3, maksimalna 6, povprečna pa ≈ 3.43 . Premer tega grafa je 5, povprečna razdalja med dvema vozliščema pa ≈ 3.31 .*

Preden se lotimo dokaza, bomo potrebovali še dva rezultata iz teorije grup.

Izrek 4.12. *Naj grupa G deluje na množico X . Označimo z \bar{x} orbito elementa x in z G_x stabilizator elementa x . Potem velja*

$$(9) \quad \forall x \in X : |G| = |\bar{x}| \cdot |G_x|.$$

Dokaz. Za dokaz se najprej spomnimo Lagrangeevega izreka, ki pravi, da za končno grupo G in njeno podgrupo $H \leq G$ velja

$$|G| = |G/H| \cdot |H|,$$

pri čemer je G/H kvocientna množica vseh odsekov. V našem primeru je $H = G_x$, vemo torej, da $\forall x$ velja

$$|G| = |G/G_x| \cdot |G_x|.$$

Dokazati želimo, da je $|G/G_x| = |\bar{x}|$. Konstruiramo preslikavo $\phi: G/G_x \rightarrow \bar{x}$ s predpisom $\phi(gG_x) = gx$. Trdimo, da je ϕ bijekcija. Velja

$$gG_x = hG_x \iff h^{-1}g \in G_x \iff h^{-1}gx = x \iff gx = hx,$$

torej je preslikava dobro definirana in injektivna. Surjektivnost preslikave ϕ pa sledi iz dejstva, da za vsak $x \in X$ lahko najdemo njegov stabilizator G_x , preslika elementa gx za nek $g \in G$ in $x \in X$ je torej gG_x .

Ker med množicama obstaja bijekcija, sledi $|G/G_x| = |\bar{x}|$ in s tem

$$|G| = |\bar{x}| \cdot |G_x|, \quad \forall x \in X. \quad \square$$

Izrek 4.13 (Burnsidova lema). *Naj grupa G deluje na množico X . Potem velja*

$$(10) \quad |X/G| = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g|, \text{ kjer je } X^g = \{x \in X \mid gx = x\},$$

oziroma z besedo: število orbit je enako povprečnemu številu negibnih točk.

Dokaz. Zapišimo vsoto vseh negibnih točk malo drugače:

$$\sum_{g \in G} |X^g| = \sum_{g \in G} \sum_{x \in X^g} 1 = \sum_{g \in G} \sum_{\substack{x \in X \\ gx=x}} 1.$$

Zamenjamo vrstni red seštevanja in uporabimo enakost (9):

$$\sum_{g \in G} |X^g| = \sum_{x \in X} \sum_{\substack{g \in G \\ gx=x}} 1 = \sum_{x \in X} |G_x| = \sum_{x \in X} \frac{|G|}{|\bar{x}|} = |G| \sum_{x \in X} \frac{1}{|\bar{x}|}.$$

Sedaj upoštevamo še, da je X disjunktna unija vseh svojih orbit v X/G :

$$\sum_{g \in G} |X^g| = |G| \sum_{\sigma \in X/G} \sum_{x \in \sigma} \frac{1}{|\sigma|} = |G| \sum_{\sigma \in X/G} 1 = |G| \cdot |X/G|.$$

Enakost (10) sledi od tod. □

Ekvivalenčne razrede množice vseh stanj/nalog lahko torej preučujemo tako, da poiščemo negibne točke zgoraj definirane delovanja in uporabimo Burnsidovo lemo. Sedaj se lahko lotimo dokaza trditve 4.11.

Dokaz trditve 4.11. Utemeljimo najprej, da je moč množice vozlišč grafa L_{222}^3 enaka 42. Če imamo po eno kroglo na vsaki palici, imamo $3!$ možnosti, kako razporediti kroglo. V nasprotnem primeru pa imamo na neki palici dve krogli, na neki drugi pa eno. Na voljo imamo torej $3 \cdot 2 \cdot 3!$ razporeditev krogel, saj se najprej odločimo, katera palica bo imela dve krogli (za to imamo na voljo 3 možnosti), nato katera palica bo imela eno kroglo (2 možnosti), nato pa še premešamo barve krogel. Skupaj imamo torej $3! + 3 \cdot 2 \cdot 3! = 42$ možnih razporeditev krogel.

Poiščimo negibne točke delovanja grupe $(\Gamma_{33}, \cdot, 1_{33})$ na množico vozlišč $V(L_{222}^3)$. Če vzamemo identiteto 1_{33} , potem je množica negibnih točk za to preslikavo enaka kar celotni množici vozlišč. Možne negibne točke za preostale preslikave pa so samo tista stanja, ki imajo po eno kroglo na vsaki palici: pri stanju z npr. dvema krogla na neki palici preslikava ne sme zamenjati palic, če želimo, da je to stanje negibna točka, zato pa preslikava ne sme zamenjati tudi barv. Nadalje lahko opazimo, da bodo negibne točke imele le tiste preslikave (λ, π) , pri katerih bosta tako χ kot π ali permutaciji brez negibne točke ali pa zrcaljenji. V tabeli 1 so predstavljene množice negibnih točk za vse preslikave iz grupe Γ_{33} .

Iz tabele 1 lahko preberemo, da je število vseh negibnih točk enako

$$\sum_{g \in \Gamma_{33}} |V(L_{222}^3)^g| = 42 + 4 \cdot 3 + 9 \cdot 2 = 72,$$

saj je število vozlišč pri tem problemu enako 42.

Uporabimo Burnsidovo lemo (10) in dobimo, da je število ekvivalenčnih razredov enako

$$\frac{1}{|\Gamma_{33}|} \sum_{g \in \Gamma_{33}} |V(L_{222}^3)^g| = \frac{72}{3! \cdot 3!} = 2.$$

$\chi \backslash \pi$	123	231	312	132	321	213
123	$V(L_{222}^3)$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset
231	\emptyset	1 2 3 2 3 1 3 1 2	1 3 2 2 1 3 3 2 1	\emptyset	\emptyset	\emptyset
312	\emptyset	1 3 2 2 1 3 3 2 1	1 2 3 2 3 1 3 1 2	\emptyset	\emptyset	\emptyset
132	\emptyset	\emptyset	\emptyset	1 2 3 1 3 2	2 1 3 3 1 2	2 3 1 3 2 1
321	\emptyset	\emptyset	\emptyset	2 1 3 2 3 1	1 2 3 3 2 1	1 3 2 3 1 2
132	\emptyset	\emptyset	\emptyset	3 1 2 3 2 1	1 3 2 2 3 1	1 2 3 2 1 3

TABELA 1. Negibne točke preslikav iz Γ_{33} .

Ker je poljubno stanje, ki ima na eni izmed palic več kot eno kroglo, fiksna točka le identične preslikave, iz formule (9) sledi, da je orbita (in s tem ekvivalenčni razred) takega stanja velikosti 36. Torej je prvi ekvivalenčni razred sestavljen iz stanj z več kot eno kroglo na neki palici, drugi pa je sestavljen iz šestih razporeditev, pri kateri je na vsaki palici točno ena krogla (te so fiksne točke šestih preslikav iz Γ_{33} .)

Pri obravnavi lastnosti tega grafa moramo torej upoštevati le dve neekvivalentni stanji, npr. $s_1 = 12|3|$ in $s_2 = 1|2|3$. Iz grafa 21 lahko vidimo, da je stanje s_1 stopnje 3, s_2 pa 6. Minimalna stopnja vozlišč je torej 3, maksimalna je 6, povprečna pa je enaka $\frac{36 \cdot 3 + 6 \cdot 6}{42} \approx 3.43$.

Za izračun povprečne razdalje med dvema vozliščema v tem grafu moramo določiti vse razdalje od enega izmed predstavnikov vsakega ekvivalenčnega razreda do poljubnega vozlišča, kar lahko naredimo s pomočjo risbe grafa 21. Na tej sliki smo že označili vse razdalje do stanj s_1 in s_2 . Vidimo, da je za obe stanji maksimalna možna razdalja do nekega poljubnega vozlišča enaka 5. Ekscentričnost vseh vozlišč v grafu je torej 5, iz česar sledi, da je tudi premer enak 5.

Vsota vseh razdalj od stanja s_1 do nekega poljubnega stanja je enaka 140, od s_2 pa 133. Sledi, da je povprečna razdalja enaka

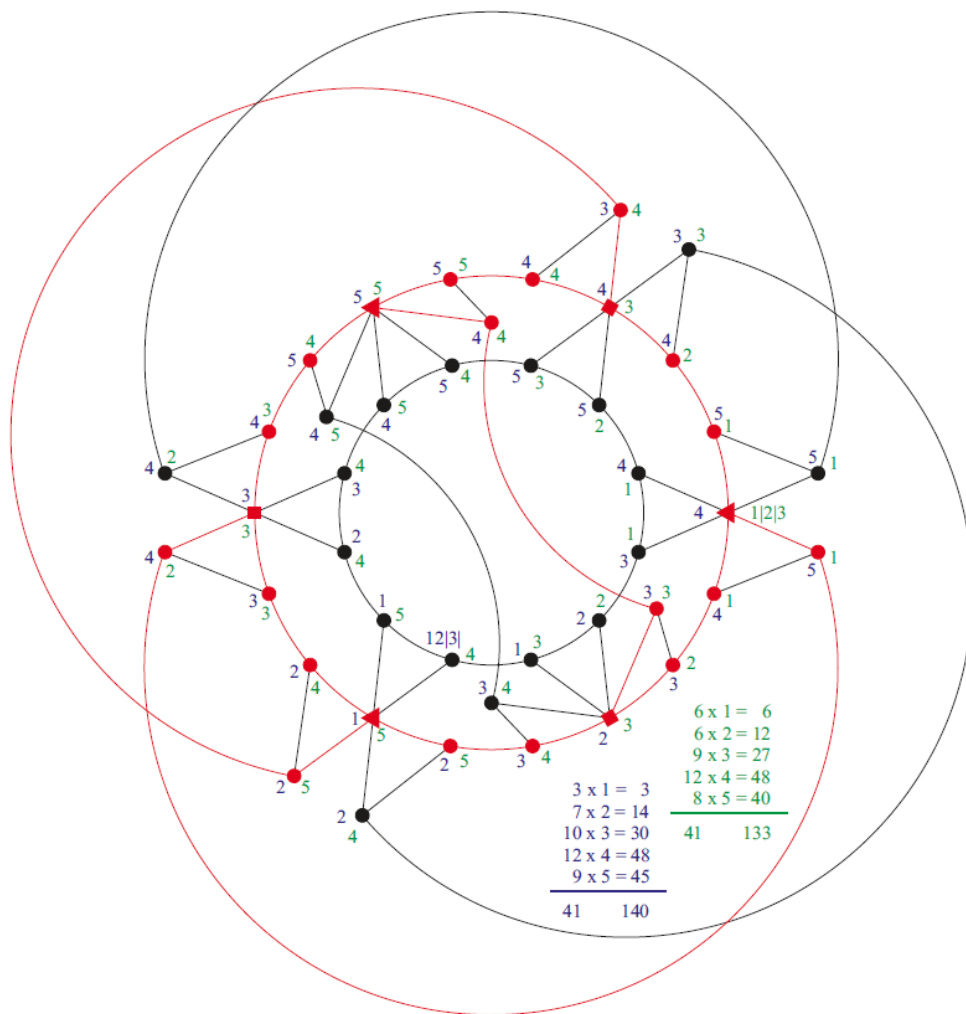
$$\frac{36 \cdot 140 + 6 \cdot 133}{42^2} = \frac{139}{42}.$$

S tem je dokaz končan. □

SLOVAR STROKOVNIH IZRAZOV

graph connectedness povezanost grafa

graph planarity ravninskost grafa



SLIKA 21. Graf L_{222}^3 z dopisanimi razdaljami do predstavnikov dveh ekvivalenčnih razredov, $s_1 = 12|3|$ in $s_2 = 1|2|3$.

eccentricity of a vertex ekscentričnost vozlišča – največja možna razdalja med danim vozliščem in poljubnim vozliščem v grafu

LITERATURA

- [1] W. K. Berg in D. L. Byrd, *The Tower of London spatial problem-solving task: Enhancing clinical and research implementation*, Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology **24** (2002) 586–604, dostopno tudi na www.researchgate.net/publication/11201010_The_Tower_of_London_Spatial_Problem-Solving_Task_Enhancing_Clinical_and_Research_Implementation.
- [2] A. M. Hinz, S. Klavžar, U. Milutinović in C. Petr, *The Tower of Hanoi – Myths and Maths*, Birkhäuser, Basel, 2013.
- [3] P. Potočnik, *Zapiski predavanj iz Diskretne matematike I*, 1. izdaja, [ogled 29. 12. 15], dostopno na www.fmf.uni-lj.si/~potocnik/Ucbeniki/DM-Zapiski2010.pdf.
- [4] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [5] *Hamiltonian path*, v: Wikipedia: The Free Encyclopedia, [ogled 28. 12. 2015], dostopno na en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian_path.
- [6] *Tim Shallice*, v: Wikipedia: The Free Encyclopedia, [ogled 8. 10. 2015], dostopno na en.wikipedia.org/wiki/Tim_Shallice.