

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Pedagoška matematika

Tom Gornik
IZREK ŠARKOVskega

Magistrsko delo

Mentor: izr. prof. dr. Aleš Vavpetič

Ljubljana, 2024

Zahvala

Neobvezno. Zahvaljujem se ...

Kazalo

Program dela

Mentor naj napiše program dela skupaj z osnovno literaturo.

Podpis mentorja:

Izrek Šarkovskega

POVZETEK

tukaj je nakaj stvari, ki povzamejo delo

Sharkovsky theorem

ABSTRACT

tukaj je nakaj stvari, ki povzamejo delo-v ang

Math. Subj. Class. (2020): 112

Ključne besede: nekaj

Keywords: something

Po zaključenem dokazu si lahko postavimo vprašanje, kako se spremenijo posledice izreka, če spremenimo njegove predpostavke. Glede na to, kako spremenimo predpostavke, lahko pridemo do različnih posplošitev izreka. V primeru izreka Šarkovskega že obstaja več posplošitev. Nekatere obravnavajo izrek za nezvezne funkcije, ki ustrezajo določenim pogojem, druge pa preučujejo zvezne preslikave, ki so namesto na intervalu definirane na drugih prostorih. V tem primeru se lahko vprašamo, kakšna ureditev naravnih števil, če ta obstaja, opiše prisotnost periodičnih točk zvezne preslikave $f : X \rightarrow X$, ki slika nek topološki prostor X nazaj vase. Natančneje, iščemo relacijo \triangleleft_X z lastnostjo: če je m perioda za zvezno preslikavo $f : X \rightarrow X$, potem je vsako naravno število l , za katero je $l \triangleleft_X m$, tudi perioda za preslikavo f . V tem poglavju si bomo najprej pogledali, kakšne periodične točke lahko ima zvezna funkcija definirana na dveh disjunktih intervalih, nato pa bomo obravnavali prisotnost periodičnih točk za zvezne preslikave na krožnici.

Primer 0.1. Definirajmo disjunktne intervale $I_1 = [-2, -1]$ in $I_2 = [1, 2]$. Naj bo prostor X unija teh dveh intervalov: $X = I_1 \cup I_2$. Funkcija $g : X \rightarrow X$ podana s predpisom $g(x) = -x$ je zvezna funkcija. Vsaka točka iz prostora X ima periodo 2, funkcija pa nima fiksne točke, torej prostor X ni prostor Šarkovskega. Vseeno lahko poiščemo relacijo \triangleleft_X , ki opiše, katere periode ima lahko funkcija. Pri poljubni funkciji $f : X \rightarrow X$ imamo štiri možnosti. Če je $f(I_1) \subseteq I_1$ in $f(I_2) \subseteq I_2$, lahko za funkciji $f|_{I_1}$ in $f|_{I_2}$ uporabimo izrek Šarkovskega in ugotovimo, da v tem primeru ureditev Šarkovskega opiše prisotnost periodičnih točk. V primeru, ko je $f(I_1) \subseteq I_1$ in $f(I_2) \subseteq I_1$, lahko periodične točke ležijo samo v intervalu I_1 . Za funkcijo $f|_{I_1}$ uporabimo izrek Šarkovskega in ugotovimo, da prisotnost periodičnih točk spet natančno opiše ureditev Šarkovskega. Podoben sklep lahko naredimo tudi v primeru, ko je $f(I_1) \subseteq I_2$ in $f(I_2) \subseteq I_2$. Drugače je v primeru $f(I_1) \subseteq I_2$ in $f(I_2) \subseteq I_1$. V tem primeru se točke iz intervala I_1 s funkcijo f slikajo v interval I_2 in obratno. Zato ima vsaka periodična točka sodo periodo. Naj bo $x \in X$ točka periode $2m$ za funkcijo f . Brez izgube splošnosti lahko sklepamo, da točka x pripada intervalu I_1 . Potem ima točka x periodo m za funkcijo $f^2|_{I_1} : I_1 \rightarrow I_1$. Ker je I_1 prostor Šarkovskega in je f^2 zvezna funkcija, lahko uporabimo izrek Šarkovskega in ugotovimo, da za vsako naravno število l , za katerega velja $l \triangleleft m$, obstaja točka $y \in I_1$ s periodo l za funkcijo f^2 . Točka y ima periodo $2l$ za funkcijo f , saj je orbita točke y sestavljena iz l različnih točk v intervalu I_1 (sode iteracije) in l različnih točk iz intervala I_2 (lihe iteracije). Ugotovili smo naslednje: Če ima zvezna funkcija $f : X \rightarrow X$ liho periodo m , potem ima zagotovo tudi vse periode l , kjer je $l \triangleleft m$. Če pa je perioda m soda, potem ima funkcija vse periode $l \neq 1$, za katere je $l \triangleleft m$. Dobimo relacijo \triangleright_X :

$$3 \triangleright_X 5 \triangleright_X 7 \triangleright_X \cdots \triangleright_X 2 \cdot 3 \triangleright_X 2 \cdot 5 \triangleright_X 2 \cdot 7 \triangleright_X \cdots \triangleright_X 2^2 \cdot 3 \triangleright_X 2^2 \cdot 5 \triangleright_X 2^2 \cdot 7 \triangleright_X \cdots \triangleright_X 2^3 \triangleright_X 2^2 \triangleright_X 2, \\ 3 \triangleright_X 5 \triangleright_X 7 \triangleright_X 9 \triangleright_X \cdots \triangleright_X 1.$$

◇

Primer 0.2. Krožnica $S^1 = \{(\cos(\varphi), \sin(\varphi)), \varphi \in [0, 1)\}$. Hitro se lahko prepričamo, da obstajajo preslikave definirane na krožnici S^1 , ki imajo samo eno periodo. To so rotacije okoli koordinatnega izhodišča. Definiramo družino preslikav:

$$R_n : S^1 \rightarrow S^1, \\ R_n : (\cos(\varphi), \sin(\varphi)) \mapsto (\cos(\varphi + \frac{2\pi}{n}), \sin(\varphi + \frac{2\pi}{n})).$$

Vse točke krožnice S^1 so periodične točke za preslikavo R_n in vse imajo periodo n . Zato iz obstoja periodične točke za zvezno preslikavo $f : S^1 \rightarrow S^1$ ne moremo sklepati na obstoj drugih period za to preslikavo. \diamond

Primer 0.2 pokaže, da s predpostavko splošne zvezne preslikave ne dobimo želenega rezultata. Če želimo priti do podobnega rezultata kot v primeru izreka Šarkovskega, moramo dodati še kakšen pogoj. V nadaljevanju bomo formulirali in dokazali izrek podoben izreku Šarkovskega, ki obravnava periode zveznih preslikav na krožnici S^1 , ki imajo vsaj eno negibno točko.

Izrek 0.3. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava. Predpostavimo, da ima preslikava f negibno točko in da je neko liho naravno število n tudi perioda preslikave f . Potem je vsako naravno število $m > n$ tudi perioda za preslikavo f .*

Zaradi lažjega dokazovanja, si pogledjmo naslednjo definicijo:

Definicija 0.4. Naj bosta $a \in S^1$ in $b \in S^1$ različni točki na krožnici. V tem poglavju bomo z zapisi $[a, b]$, (a, b) , $(a, b]$, $[a, b)$ označevali zaprt, odprt, pol odprt in pol zaprt interval na krožnici S^1 , ki predstavljajo množice točk na krožnici od točke a do točke b v nasprotni smeri urinega kazalca. Intervalu, ki je različen od celotne krožnice S^1 , bomo rekli pravi podinterval.

Relacijo pokritja intervalov bomo definirali malo drugače, kot v poglavju ??.

Definicija 0.5. Naj bosta $I, J \subset S^1$ prava zaprta podintervala krožnice S^1 in naj bo $f : I \rightarrow J$ zvezna preslikava. Pravimo, da interval I f -pokrije interval J , če obstaja tak interval $K \subseteq I$, za katerega velja $f(K) = J$. Relacijo zapišemo kot $I \xrightarrow{f} J$. Kadar je jasno, katero preslikavo imamo v mislih, lahko rečemo samo, da interval I pokrije interval J . V tem primeru lahko nadpis, ki označi katero preslikavo imamo v mislih izpustimo in pišemo samo $I \rightarrow J$.

Preden se lotimo dokazovanja izreka 0.3, bomo dokazali leme, ki so pomembne pri dokazu izreka in spoznali kakšno definicijo, ki nam olajša zapis pri dokazovanju.

Lema 0.6. *Naj bo $I = [a, b]$ zaprt interval na krožnici S^1 in naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava. Predpostavimo, da je $f(a) = c$ in $f(b) = d$ in $c \neq d$. Potem velja $I \rightarrow [c, d]$ ali $I \rightarrow [d, c]$.*

Dokaz. Naj bo $A = \{x \in I; f(x) = c\}$. Ker je preslikava f zvezna, je množica A zaprta podmnožica kompaktne množice I , zato je tudi množica A kompaktna. Obstaja točka $v \in A$, za katero je $(v, b] \cap A = \emptyset$. Naj bo $B = \{x \in (v, b]; f(x) = d\}$. Zaradi podobnega razmisleka kot pri množici A obstaja točka $w \in B$, za katero je $[v, w) \cap B = \emptyset$. Velja $f(v) = c$, $f(w) = d$ in $f(x) \notin \{c, d\}$ za vsak $x \in (v, w)$. Zaradi zveznosti preslikave f velja ena od enakosti $f([u, v]) = [c, d]$ ali $f([u, v]) = [d, c]$, zato velja ena od relacij $I \rightarrow [c, d]$ ali $I \rightarrow [d, c]$. \square

Lema 0.7. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in naj bosta I in J prava zaprta intervala na S^1 , za katera velja $I \rightarrow J$. Če je $L \subseteq J$ zaprt interval, potem velja $I \rightarrow L$.*

Dokaz. Za intervala I in J velja relacija $I \rightarrow J$, zato obstaja interval $K \subset I$, za katerega je $f(K) = J$. Naj bo $L = [c, d] \subset J$. Obstajata točki $a, b \in K$ za kateri veljata enakosti $f(a) = c$ in $f(b) = d$. Označimo s K_1 tisti interval s krajiščima a in b , ki leži v intervalu K . Zaradi leme 0.6 velja $K_1 \rightarrow [c, d]$ ali $K_1 \rightarrow [d, c]$. Zaradi enakosti $f(K) = J$, in ker je K_1 podinterval intervala K , ne more veljati $K_1 \rightarrow [d, c]$, zato velja $K_1 \rightarrow [c, d]$. Ker je $K_1 \subseteq K \subseteq I$, velja $I \rightarrow [c, d]$. \square

Lema 0.8. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in I pravi zaprt podinterval krožnice S^1 . Če velja relacija $I \rightarrow I$, potem ima preslikava f negibno točko na intervalu I .*

Dokaz. Zaradi relacije $I \rightarrow I$ obstaja zaprt interval $K \subseteq I$, za katerega velja $f(K) = I$. Obstajata taki točki $v, w \in K$, da sta $f(v)$ in $f(w)$ krajišči intervala I . Označimo z L zaprt podinterval intervala K s krajišči v in w . Zaradi zveznosti preslikave f obstaja točka $x \in L$, za katero velja $f(x) = x$. \square

Opomba 0.9. Pogoj I je pravi interval je potreben pogoj, saj v primeru $I = S^1$ lema 0.8 ne drži kot pokaže primer 0.2.

Lema 0.10. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in naj bojo M_1, M_2, \dots, M_n pravi zaprti podintervali na krožnici S^1 , za katere veljajo relacije pokritja*

$$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_n \rightarrow M_1.$$

Potem obstaja točka $z \in M_1$, za katero je $f^i(z) \in M_{i+1}$ za $i = 1, \dots, n-1$ in $f^n(z) = z$.

Dokaz. Velja relacija $M_n \rightarrow M_1$, zato obstaja interval $J_n \subseteq M_n$, za katerega je $f(J_n) = M_1$. Podobno obstajajo tudi taki intervali J_1, \dots, J_{n-1} , da za vsak $k = 1, \dots, n-1$ velja $J_k \subseteq M_k$ in $f(J_k) = J_{k+1}$. Sledi, da je $f^n(J_1) = M_1$. S pomočjo dokaza leme 0.8 lahko sklepamo, da ima f^n negibno točko $z \in J$. Očitno velja $z \in M_1, f(z) \in M_2, \dots, f^{n-1}(z) \in M_n$, kar zaključí dokaz. \square

Definicija 0.11. Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in $P = \{p_1, p_1, \dots, p_n\}$ orbita preslikave f s periodo n . Pravimo, da je orbita P urejena, če za vsak $k = 1, \dots, n-1$ velja enakost $P \cap (p_k, p_{k+1}) = \emptyset$ in $P \cap (p_n, p_1) = \emptyset$. V tem primeru definiramo n intervalov določenih s P :

$$I_1 = [p_1, p_2], I_2 = [p_2, p_3], \dots, I_{n-1} = [p_{n-1}, p_n], I_n = [p_n, p_1].$$

Lema 0.12. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava. S $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ označimo f -orbito z liho periodo $n \geq 3$. Predpostavimo, da je P urejena in z I_1, \dots, I_n označimo intervale določene s P . Denimo, da obstajata taki števili $i, j \in \{1, \dots, n\}$, za kateri ne obstaja naravno število $k \in \{1, \dots, n\}$, kjer je $k \neq i$, za katerega velja $I_k \rightarrow I_i$ in ne obstaja tako naravno število $l \in \{1, \dots, n\}$, kjer je $l \neq j$, za katerega velja $I_l \rightarrow I_j$. Potem je $i = j$.*

Dokaz. Predpostavimo, da sta I_j in I_k različna intervala določena s P . Izberemo točko v iz notranjosti intervala I_j in izberemo točko w iz notranjosti intervala I_k . Točki v in w sta različni. S pomočjo točk v in w razdelimo cikel P na dve disjunktni

množici. Naj bo $A = P \cap (v, w)$ in $B = P \cap (w, v)$. Množici A in B sta neprazni in disjunktni. Njuna unija je enaka množici P .

Trdimo: če je za neko število x iz množice A tudi točka $f(x)$ vsebovana v množici A , potem je celotna slika množice A s preslikavo f vsebovana v množici A . Res, saj v nasprotnem primeru obstajata dve sosednji točki $x, y \in A$, za kateri velja $f(x) \in A$ in $f(y) \notin A$. V tem primeru lahko s pomočjo leme 0.6 in leme 0.7 sklepamo, da najkrajši interval s krajiščima x in y pokrije interval I_j ali interval I_k , kar je v nasprotju s predpostavkami leme 0.12. Slika množice A ne more biti v celoti vsebovana v množici A , saj je množica P cikel za preslikavo f . Sklepamo, da je slika množice A s preslikavo f v celoti vsebovana v množici B . S podobnim sklepom ugotovimo, da je slika množice B s preslikavo f v celoti vsebovana v množici A . Ker preslikava f slika množico P nazaj v množico P , velja $f(A) = B$ in $f(B) = A$. Preslikava f je bijekcija med množicama A in B , zato imata množici enako število elementov. Ker je unija množic A in B enaka ciklu P , presek množic A in B pa je prazen, ima f -orbita P sodo število elementov. To je v protislovju s predpostavko, da je v f -orbiti liho število elementov. \square

Lema 0.13. *Predpostavimo, da ima zvezna preslikava $f : S^1 \rightarrow S^1$ periodično orbito $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ z liho periodo $n \geq 3$. Denimo, da je P urejena in da so I_1, \dots, I_n intervali določeni s P . Naj ima preslikava f negibno točko e . Potem ima f negibno točko z , ki ima naslednjo lastnost: Če je I_k interval določen z orbito P , ki vsebuje točko z , potem obstaja naravno število $j \in \{1, \dots, n\}$, kjer je $j \neq k$, za katero velja $I_j \rightarrow I_k$.*

Dokaz. Po predpostavkah leme 0.13 ima preslikava f negibno točko e . Brez izgube splošnosti lahko sklepamo, da je $e \in I_n$. Prav tako lahko predpostavimo, da relacija pokritja $I_j \rightarrow I_n$ ne velja za nobeno število $j = 1, \dots, n-1$. V nasprotnem primeru izberemo $z = e$, kar zaključí dokaz. Naj bo m najmanjše naravno število, za katerega iz enakosti $f(p_m) = p_r$ sledi neenakost $r < m$. Za število m velja sistem neenakosti $2 \leq m \leq n$, ki ga lahko preoblikujemo tako, da vsem členom odštejemo 1 in dobimo sistem neenakosti $1 \leq m-1 \leq n-1$, iz česar sklepamo, da velja $m-1 \neq n$. Denimo, da je $f(p_m) = p_r$ in $f(p_{m-1}) = p_q$. Potem je $I_{m-1} \subseteq (p_r, p_q)$ in $I_n \subseteq (p_q, p_r)$. S pomočjo leme 0.6 in leme 0.7 sklepamo, da velja relacija $I_{m-1} \rightarrow I_n$ ali $I_{m-1} \rightarrow I_{m-1}$. Toda na začetku dokaza smo predpostavili, da relacija $I_j \rightarrow I_n$ ne velja za nobeno naravno število $j < n$, zato velja relacija $I_{m-1} \rightarrow I_{m-1}$. S pomočjo leme 0.8 sklepamo, da ima preslikava f negibno točko z na intervalu I_{m-1} . Ker za nobeno naravno število $j = 1, \dots, n-1$ ne velja relacija $I_j \rightarrow I_n$ iz leme 0.12 sledi, da obstaja $j \in \{1, \dots, n\}$, $j \neq m-1$, za katerega velja relacija $I_j \rightarrow I_{m-1}$. \square

Lema 0.14. *Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in naj bo P orbita preslikave f s periodo $m \geq 3$. Denimo, da za nek $k \in \{2, \dots, m\}$ množica zaprtih intervalov $\{M_1, \dots, M_k\}$ izpolnjuje naslednje pogoje:*

1. za vsak $j \in \{1, \dots, k\}$ notranjost intervala M_j ne vsebuje nobene točke iz P ,
2. če je $i \neq j$, potem imata intervala M_i in M_j disjunktni notranjosti,
3. za $j \in \{2, \dots, k\}$ so krajišča intervala M_j vsebovana v P ,

4. če je b krajišče M_1 , potem je $b \in P$ ali b je negibna točka preslikave f ,
5. za vsak $j \in \{1, \dots, k-1\}$ velja relacija $M_j \rightarrow M_{j+1}$,
6. veljata relaciji $M_1 \rightarrow M_1$ in $M_k \rightarrow M_1$,

potem je vsako naravno število $n > k$ perioda preslikave f .

Dokaz. Recimo, da je $n > k$. Predpostavimo, da je $n \neq m$, saj ima po predpostavkah leme preslikava f točko periode m . Označimo intervale $L_1 = M_1, L_2 = M_1, \dots, L_{n-k} = M_1, L_{n-k+1} = M_1, L_{n-k+2} = M_2, L_{n-k+3} = M_3, \dots, L_{n-k+k} = L_n = M_k$. Če uporabimo lemo 0.10 na intervalih L_1, \dots, L_n ugotovimo, da obstaja negibna točka z za preslikavo f^n , za katero velja $z \in L_1, f(z) \in L_2, \dots, f^{n-1}(z) \in L_n$. Točka z leži v intervalu M_1 , točka $f^{n-k+1}(z)$ pa v intervalu M_2 iz česar s pomočjo pogoja 2 in pogoja 3 iz predpostavk leme sklepamo, da z ni negibna točka preslikave f .

Trdimo tudi, da točka z ne pripada ciklu P . Predpostavimo najprej, da je $n \geq k+2$. Potem je $L_1 = L_2 = L_3 = M_1$. Torej, točke $z, f(z)$ in $f^2(z)$ ležijo v intervalu M_1 . Ker je P cikel dolžine $m \geq 3$, lahko s pomočjo pogoja 1 sklepamo, da točka z ne pripada orbiti P . Sedaj predpostavimo, da je $n < k+2$. Potem je $n < m+2$. Ker je $n \neq m$ in $m \geq 3$, število n ni večkratnik števila m . Iz enakosti $f^n(z) = z$ sledi, da točka z ne pripada ciklu P .

Ugotovili smo, da točka z ni negibna točka preslikave f in tudi ne pripada ciklu P , zato lahko s pomočjo pogoja 4 iz predpostavk leme sklepamo, da z leži v notranjosti intervala M_1 . Ker točka $f^n(z) = z$ ne pripada ciklu P , za vsako naravno število $r < n$ tudi točka $f^r(z)$ ne pripada ciklu P . Trdimo, da $f^r(z)$ ni negibna točka preslikave f . Zaradi pogojev 3 in 4 za vsako naravno število $r < n$ velja, da $f^r(z)$ ni krajišče nobenega intervala M_1, \dots, M_k . S pomočjo te ugotovitve, pogoja 2 in dejstva, da je $z \in M_1, f(z) \in M_1, f^2(z) \in M_1, \dots, f^{n-k}(z) \in M_1, f^{n-k+1}(z) \in M_2, \dots, f^{n-1}(z) \in M_k$, sklepamo, da je točka z periodična točka preslikave f s periodo n . \square

Dokažimo izrek:

Dokaz izreka 0.3. Po predpostavki izreka obstaja f -orbita $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ s periodo n . Brez izgube splošnosti lahko predpostavimo, da je orbita P urejena in so I_1, \dots, I_n intervali določeni s P . Po predpostavkah izreka ima preslikava negibno točko e . Predpostavimo, da točka e leži v intervalu I_n . Po lemi 0.13 lahko predpostavimo, da obstaja tako naravno število $j \in \{1, \dots, n-1\}$, za katerega velja $I_j \rightarrow I_n$. Označimo $f(p_1) = p_s$ in $f(p_n) = p_t$. Imamo dve možnosti.

Prva možnost: Velja $[e, p_1] \rightarrow [e, p_s]$ ali velja $[p_n, e] \rightarrow [p_t, e]$. Ker lahko v obeh primerih dokaz izpeljemo na enak način, predpostavimo, da velja $[e, p_1] \rightarrow [e, p_s]$. S pomočjo leme 0.7 sklepamo, da velja $[e, p_1] \rightarrow [e, p_1]$ in za vsak $j \in \{1, \dots, s-1\}$ velja $[e, p_1] \rightarrow I_j$. Recimo, da za neko število $j \in \{1, \dots, s-1\}$ velja $I_j \rightarrow I_n$. Potem so izpolnjene predpostavke leme 0.14 za $k = 2$, $M_1 = [e, p_1]$ in $M_2 = I_j$. Lema 0.14 zagotavlja obstoj vseh period $m > 2$.

Torej, lahko predpostavimo, da za nobeno število $j \in \{1, \dots, s-1\}$ ne velja $I_j \rightarrow I_n$. Ker za neko število $j \in \{1, \dots, n-1\}$ velja $I_j \rightarrow I_n$, je $s-1 < n-1$. Torej, velja $s < n$.

Obstaja naravno število $r \in \{2, \dots, s\}$, za katerega vrednost preslikave $f(p_r)$ ne leži v množici $\{p_1, \dots, p_s\}$. Brez izgube splošnosti lahko predpostavimo, da je r najmanjše število s to lastnostjo. Velja $f(p_{r-1}) \in \{p_1, \dots, p_s\}$. Označimo $f(p_r) = p_q$. Ker ne velja $I_{r-1} \rightarrow I_n$, lahko s pomočjo leme 0.6 in leme 0.7 sklepamo, da velja $I_{r-1} \rightarrow [f(p_{r-1}), p_q]$. Torej, za vsako naravno število $j \in \{s, \dots, q-1\}$ velja $I_{r-1} \rightarrow I_j$.

Glede na definicijo točke p_q opazimo, da je $s \leq q-1$. Denimo, da obstaja pozitivno naravno število $j \in \{s, \dots, q-1\}$, za katero velja $I_j \rightarrow I_n$. Potem so izpolnjene predpostavke leme 0.14 za $k=3$, $M_1 = [e, p_1]$, $M_2 = I_{r-1}$ in $M_3 = I_j$, kar zagotavlja obstoj vseh period $m > 3$.

Postopek opisan v zadnjih treh odstavkih ponavljamo in po največ n korakih, z upoštevanjem dejstva, da za neko naravno število $j = 1, \dots, n-1$ velja $I_j \rightarrow I_n$, sčasoma konstruiramo množico intervalov $\{M_1, M_2, \dots, M_k\}$, kjer je $k \leq n$, za katero so izpolnjene predpostavke leme 0.14. To pa zagotavlja obstoj vseh period $m > k$ za preslikavo f .

Druga možnost: Ne velja $[e, p_1] \rightarrow [e, p_s]$ in ne velja $[p_n, e] \rightarrow [p_t, e]$. S pomočjo leme 0.6 se prepričamo, da velja $[e, p_1] \rightarrow [p_s, e]$ in velja $[p_n, e] \rightarrow [e, p_t]$. Trdimo, da velja $I_n = [p_n, p_1] \rightarrow I_n$. Ker velja $[e, p_1] \rightarrow [p_s, e]$ in je $p_n \in [p_s, e]$, obstaja taka točka $a \in (e, p_1]$, za katero je $f(a) = p_n$, vendar za vsak $x \in (e, a)$ velja $f(x) \neq p_n$. Opazimo, da je $f(e) = e$ in $f(a) = p_n$, zato velja $[e, a] \rightarrow [e, p_n]$ ali $[e, a] \rightarrow [p_n, e]$. Vemo že, da ne velja $[e, p_1] \rightarrow [e, p_s]$, zato tudi ne velja $[e, a] \rightarrow [e, p_s]$. S pomočjo leme 0.7 sklepamo, da ne velja $[e, a] \rightarrow [e, p_n]$, torej velja $[e, a] \rightarrow [p_n, e]$. Zapišemo lahko $[p_n, e] \subseteq f([e, a])$.

Denimo, da obstaja neka točka $z \in [e, a]$, za katero velja $f(z) \notin [p_n, p_1]$. Ker $f(z) \notin [p_n, p_1]$ in $f(e) \in [p_n, p_1]$, zaradi zveznosti obstaja točka $q \in (e, a)$, za katero je $f(q) = p_1$ ali $f(q) = p_n$. Ker je $q \in (e, a)$, mora biti $f(q) \neq p_n$, saj smo tako definirali točko a . Torej velja $f(q) = p_1$. Iz definicije točke a sledi, da je $f([e, a])$ zaprt interval na krožnici S^1 , ki je pravi podinterval krožnice S^1 . Eno krajišče intervala $f([e, a])$ je točka p_n . Točki e in p_1 sta tudi vsebovani v intervalu $f([e, a])$, zato lahko s pomočjo leme 0.13 sklepamo, da velja $[p_n, p_1] \subseteq f([e, a])$ ali $[e, p_n] \subseteq f([e, a])$. Če velja $[e, p_n] \subseteq f([e, a])$, podobno kot pri dokazu leme 0.7 z uporabo dejstva, da velja $f([e, a]) \neq S^1$, sklepamo, da velja $[e, a] \rightarrow [e, p_n]$. To s pomočjo leme 0.7 zagotavlja relacijo $[e, a] \rightarrow [e, p_s]$. Torej tudi relacijo $[e, p_1] \rightarrow [e, p_s]$, kar je protislovje. Zato je interval $[p_n, p_1]$ vsebovan v intervalu $f([e, a])$. Ker je $f([e, a]) \neq S^1$, sklepamo, da velja $[e, a] \rightarrow [p_n, p_1]$. Velja tudi $[p_n, p_1] \rightarrow [p_n, p_1]$. Trditev smo dokazali v primeru, ko obstaja točka $z \in (e, a)$, za katero velja $f(z) \notin [p_n, p_1]$. Sedaj lahko predpostavimo, da je $f([e, a]) \subseteq [p_n, p_1]$.

Ker velja $[p_n, e] \rightarrow [e, p_t]$, obstaja točka $b \in [p_n, e]$, za katero je $f(b) = p_1$ in za vsak $x \in (b, e)$ velja $f(x) \neq p_1$. Z enakim argumentom, kot smo pokazali, da je $[p_n, e] \subseteq f([e, a])$ utemeljimo, da je $[e, p_1] \subseteq f([b, e])$. Na enak način kot smo utemeljili predpostavko, da je $f([e, a]) \subseteq [p_n, p_1]$, lahko utemeljimo predpostavko, da je $f([b, e]) \subseteq [p_n, p_1]$.

Torej velja $f([b, a]) = [p_n, p_1]$. Ker je $[b, a] \subseteq [p_n, p_1]$, je res izpolnjena relacija pokritja $[p_n, p_1] \rightarrow [p_n, p_1]$.

Iz relacije $[e, p_1] \rightarrow [p_s, e]$ lahko sklepamo, da velja relacija $[p_n, p_1] \rightarrow [p_s, e]$. Enako lahko iz relacije $[p_n, e] \rightarrow [e, p_t]$ sklepamo, da je izpolnjena relacija $[p_n, p_1] \rightarrow [e, p_t]$. Lema 0.7 zagotavlja, da za vsako naravno število $j \in \{1, \dots, t-1\} \cup \{s, \dots, n-$

1} velja $[p_n, p_1] \rightarrow I_j$.

Predpostavimo, da obstaja naravno število $j \in \{1, \dots, t-1\} \cup \{s, \dots, n-1\}$, za katerega velja $I_j \rightarrow I_n$. Potem je izrek dokazan, saj so izpolnjene predpostavke leme 0.14 za $k = 2, M_1 = I_n$ in $M_2 = I_j$. Torej, predpostavimo, da za nobeno naravno število $j \in \{1, \dots, t-1\} \cup \{s, \dots, n-1\}$ ne velja relacija $I_j \rightarrow I_n$. Ker za nek $j \in 1, \dots, n-1$ velja $I_j \rightarrow I_n$, je število t strogo manjše od števila s .

Prepričajmo se, da ne moreta biti istočasno izpolnjena pogoja $f(\{p_1, \dots, p_t\}) \subseteq \{p_s, \dots, p_n\}$ in $f(\{p_s, \dots, p_n\}) \subseteq \{p_1, \dots, p_t\}$. V nasprotnem primeru je množica $P = \{p_1, \dots, p_t, p_s, \dots, p_n\}$ orbita točke p_1 . Toda orbita točke p_1 je enaka $P = \{p_1, \dots, p_n\}$. To pomeni, da je $t = s-1$ in imata množici $\{p_1, \dots, p_t\}$ in $\{p_s, \dots, p_n\}$ enako število elementov. To pa bi pomenilo, da ima množica P sodo število elementov, kar je v nasprotju s predpostavko, da ima orbita P liho periodo. Brez izgube splošnosti lahko predpostavimo, da množica $f(\{p_1, \dots, p_t\})$ ni podmnožica množice $\{p_s, \dots, p_n\}$.

Naj bo w najmanjše naravno število, za katero velja $f(p_w) \notin \{p_s, \dots, p_n\}$. Potem je $2 \leq w \leq t$ in velja $I_{w-1} \rightarrow [f(p_{w-1}), f(p_w)]$ ali $I_{w-1} \rightarrow [f(p_w), f(p_{w-1})]$. Recimo, da velja $I_{w-1} \rightarrow [f(p_{w-1}), f(p_w)]$. Potem velja tudi $I_{w-1} \rightarrow I_n$, kar je v protislovju s predpostavko. Velja torej $I_{w-1} \rightarrow [f(p_w), f(p_{w-1})]$, iz česar lahko sklepamo, da velja tudi $I_{w-1} \rightarrow [f(p_w), p_s]$. Označimo $f(p_w)$ s p_v . Število v je manjše ali enako $s-1$ in za vsako naravno število $j \in \{v, \dots, s-1\}$ velja $I_{w-1} \rightarrow I_j$.

Denimo, da obstaja tako naravno število $j \in \{v, \dots, s-1\}$, za katero velja $I_j \rightarrow I_n$. Potem so izpolnjene predpostavke leme 0.14 za $k = 3, M_1 = I_n, M_2 = I_{w-1}$ in $M_3 = I_j$, kar zagotavlja, da veljajo posledice izreka.

Postopek opisan v zadnjih štirih odstavkih ponavljamo in po največ n korakih, z upoštevanjem dejstva, da za neko naravno število $j = 1, \dots, n-1$ velja $I_j \rightarrow I_n$, sčasoma konstruiramo množico zaprtih intervalov $\{M_1, M_2, \dots, M_k\}$, kjer je $k \leq n$, za katero so izpolnjene predpostavke leme 0.14. To pa zagotavlja obstoj vseh period $m > k$ za preslikavo f , kar zaključuje dokaz. \square

