

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Matematika – 2. stopnja

Tom Gornik
Izrek Šarkovskega

Magistrsko delo

Mentor: izr. prof. dr. Aleš Vavpetič

Ljubljana, 2023

KAZALO

Izrek Šarkovskega

POVZETEK

Sharkovsky theorem

ABSTRACT

Math. Subj. Class. (2010):

Ključne besede:

Keywords: Po zaključenem dokazu si lahko postavimo vprašanje, kako se spre-

menijo 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 funkcije, 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 funkcije $f : X \rightarrow X$, ki slika nek topološki prostor X nazaj vase. Natančneje, iščemo relacijo \triangleleft_X z lastnostjo: če je m perioda za zvezno funkcijo $f : X \rightarrow X$, potem je vsako naravno število l , za katero je $l \triangleleft_X m$, tudi perioda za funkcijo f . V tem poglavju si bomo najprej pogledali, kakšne periodične točke lahko ima zvezna funkcija definirana na dveh disjunktnih intervalih, nato pa bomo pogledali prisotnost periodičnih točk za zvezne funkcije na krožnici.

Na začetku si pogledjmo, kaj lahko povemo o periodah funkcije, ki je definirana na dveh disjunktnih intervalih.

Primer 0.1. Naj bo prostor X unija dveh disjunktnih intervalov $X = I_1 \cup I_2$, kjer sta I_1 in I_2 disjunktna intervala v množici \mathbb{R} . 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. 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 je relacija \triangleleft_X enaka relaciji Šarkovskega. 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 je relacija \triangleleft_X enaka relaciji 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 :

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

◇

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

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

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

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

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

Zaradi lažjega dokazovanja, si pogledajmo naslednjo definicijo:

Definicija 0.4. Naj bosta $a \in S^1$ in $b \in S^1$ različni točki na krožnici. Z zapisi $[a, b]$, (a, b) , $[a, b)$, $(a, b]$ označimo zaprt, odprt, pol odprt in pol zaprt interval, ki predstavljajo množice točk na krožnici od točke a do točke b v nasprotni smeri urinega kazalca.

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 funkcijo imamo v mislih, lahko rečemo samo, da interval I pokrije interval J . V tem primeru, lahko nadpis, ki označi katero funkcijo imamo v mislih izpustimo in pišemo samo $I \rightarrow J$.

Preden se lotimo dokazovanja izreka 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 $f(b) = d$. Potem velja $I \rightarrow [c, d]$ ali $I \rightarrow [d, c]$.*

Dokaz. Naj bo $A = \{x \in I; f(x) = c\}$. Ker je funkcija f zvezna, je praslika $f^{-1}(c) = A$ 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 $B = \{x \in I; f(x) = d\}$. 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 funkcije f velja ena od enakosti $f([v, w]) = [c, d]$ ali $f([v, w]) = [d, c]$, 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 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 $L = [c, d]$. 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 $K \rightarrow [d, c]$, zato velja $K \rightarrow [c, d]$. 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 zaprt interval na krožnici S^1 . Če velja relacija $I \rightarrow I$, potem ima funkcija 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 . \square

Lema 0.9. Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in naj bojo M_1, M_2, \dots, M_n zaprti intervali 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 $f^n(z) = z$. S pomočjo leme 0.8 sklepamo, da obstaja negibna točka $z \in M_1$ za funkcijo f^n . Veljajo tudi vsebovanosti $z \in M_1, f(z) \in M_2, \dots, f^{n-1}(z) \in M_n$, kar zaključimo dokaz.

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 $f_k \subseteq M_k$ in $f(J_k) = J_{k+1}$. Sledi, da je $f^n(J_1) = M_1$. \square

Definicija 0.10. Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna funkcija in $P = \{p_1, p_1, \dots, p_n\}$ orbita funkcije 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 0.11. 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. Naj bo \square

Lema 0.12. Predpostavimo, da ima zvezna funkcija $f : S^1 \rightarrow S^1$ 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 funkcija f negibno točko e . Potem ima f negibno točko z , za katero obstaja interval I_j določen s P ,

Dokaz. Po predpostavkah leme ima funkcija 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 zaključimo 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 $m-1 \neq n$. 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 ?? 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 vsa naravna števila $j < n$, zato velja relacija $I_{m-1} \rightarrow I_{m-1}$. S pomočjo leme 0.8 sklepamo, da ima funkcija f negibno točko z na intervalu I_{m-1} . Ker za nobeno naravno število $j = 1, \dots, n$ ne velja relacija $I_j \rightarrow I_n$ iz leme 0.11 sledi, da obstaja $j \in \{1, \dots, n\}$, $j \neq m-1$, za katerega velja relacija $I_j \rightarrow I_{m-1}$. \square

Lema 0.13. Naj bo $f : S^1 \rightarrow S^1$ zvezna preslikava in naj bo P periodična orbita funkcije f s periodo $m \geq 3$. Denimo, da za nek $k \in \{2, \dots, n\}$ 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 intervala M_1 , potem je $b \in P$, ali b je negibna točka funkcije 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 $m > k$ perioda funkcije f .

Dokaz. Recimo, da je $n > k$. Predpostavimo lahko, da je $n \neq m$, saj ima po predpostavkah leme funkcija 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 ?? na intervalih L_1, \dots, L_n ugotovimo, da obstaja negibna točka z za funkcijo 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 lahko s pomočjo pogoja 2 in pogoja 3 iz predpostavk leme sklepamo, da z ni negibna točka funkcije 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 funkcije 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 lahko tudi, da $f^r(z)$ ni negibna točka funkcije 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 ?? in dejstva, da je $z \in M_1, f(z) \in M_1, f^2(z) \in M_1, \dots, f^{n-k}(z) \in M_1, f^{n-k+1}(z) \in M_2, \dots, f^{n-1}(z) \in M_k$, lahko sklepamo, da je točka z periodična točka funkcije f s periodo n . \square

Dokažimo izrek:

Dokaz. 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 intervale določeni s P . Po predpostavkah izreka ima funkcija negibno točko e . Predpostavimo lahko, da točka e leži v intervalu I_n . Po lemi 0.12 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 $j \in \{q, \dots, s-1\}$ velja $I_j \rightarrow I_n$. Potem so izpolnjene predpostavke leme 0.13 za $k=2$, $M_1 = [e, p_1]$ in $M_2 = I_j$. Lema 0.13 zagotavlja obstoj vseh period $m > 2$.

Torej, lahko predpostavimo, da za vsako 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 funkcije $f(p_r)$ 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 0.13 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 0.13. To pa zagotavlja obstoj vseh period $m > k$ za funkcijo 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 $[e, a] \rightarrow [p_n, e]$ \square