

11 |

научни рад
scientific paper



ПРИМЕНА МЕТОДЕ КИШНОГ ТОКА ПРИ ОДРЕЂИВАЊУ БРОЈА ЦИКЛУСА УСЛЕД ЦИКЛИЧНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА КОНСТРУКЦИЈА

Петар Кнежевић, *petar.knezevic.dunp@gmail.com*, Државни универзитет у Новом Пазару
Драгослав Шумарац, *sumi@eunet.rs*, Грађевински факултет, Београд
Миљивоје Милановић, *pbarhisnp@gmail.com*, Државни универзитет у Новом Пазару

Резиме:

Код конструкција које су у току свог животног века доминантно изложене цикличном оптерећењу, настају оштећења, која у крајњем случају доводе до слома услед замора материјала. Најзначајнији параметри цикличног оптерећења су опсег напона и број циклуса оптерећења. При оптерећењу константне амплитуде, број циклуса се може једноставно одредити. Метода кишног тока представља најраспрострањенију методу одређивања броја циклуса код произвољних историја оптерећења. У овом раду ће бити приказана примена различитих алгоритама методе кишног тока при анализи произвољне историје оптерећења.

Кључне речи: Замор, циклично оптерећење, метод кишног тока, број циклуса.

APPLICATION OF RAINFLOW METHOD IN DETERMINING NUMBER OF CYCLES DUE TO CYCLING LOADS ON CONSTRUCTIONS

Abstract:

Predominantly exposure to cyclic loading of construction during life time, resulting damage, which ultimately lead to collapse by fatigue. The most important parameters of cyclic loadings are the stress range and the number of cycles. For the load with a constant amplitude, the number of cycles can be easily determined. Rainflow method is the widespread used method for determining number of cycles for the arbitrary load history. This paper will show the application of different algorithms of rainflow method in the analysis of arbitrarily load history.

Keywords: Fatigue, cyclic load, rainflow cyclic counting method, number of cycles.

1. УВОД

Циклично оптерећење променљиве амплитуде, представља најчешћи вид оптерећења које проузрокује замор конструкција, а метод кишног тока најзаступљенији метод одређивања броја циклуса таквог оптерећења. Његова распрострањеност и прихваћеност се огледа у физичкој природи пуног циклуса, који је представљен затвореном хистерезисном петљом на дијаграму напон-дилатација.

Концепт ове методе први су дали *Matsuishi* и *Endo* [1], при чему је направљена аналогија са кишном капи која тече низ ред надстршница. Наведена метода је развијена тако да броји полуциклусе, а затим их упарује у пуне циклусе. Започети ток (полуциклус) се завршава уколико је задовољен један од критеријума:

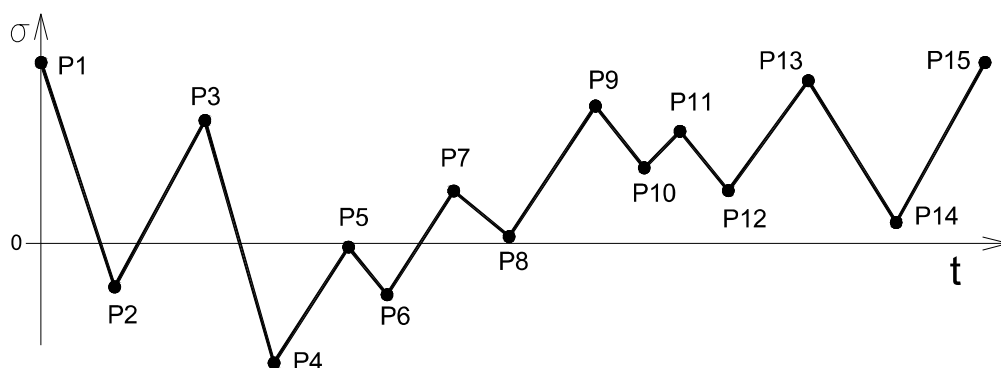
- g) ток започет у локалном максимуму (врх) пада на нови ток започет у локалном максимуму, већем од оног из којег је првобитни ток започео;
- h) ток започет у локалном минимуму (увала) пада на нови ток започет у локалном минимуму, мањем од оног из којег је првобитни ток започео;
- i) ток испада ван историје оптерећења
- j) ток наилази на већ започети ток.

Наведени алгоритам захтева познавање целокупне историје оптерећења, чиме не омогућава тренутну обраду података и потражује велику меморију за складиштење истих. Како би се наведени недостаци елиминисали, развијено је више алгоритама од којих су најпознатији:

- k) критеријум три тачке,
- l) критеријум четири тачке.

Ови алгоритми и њихове варијације се заснивају на тренутној анализи историје оптерећења и извлачења пуних циклуса из ње, где се пун циклус манифестује као затворена хистерезисна петља.

Примена различитих критеријума, ће бити спроведена на историји оптерећења променљиве амплитуде, приказане на слици.



Слика 1. Историја оптерећења променљиве амплитуде

2. МЕТОДА КИШНОГ ТОКА – КРИТЕРИЈУМ ТРИ ТАЧКЕ

Критеријум три тачке представља увод у нешто сложенији али чешће коришћени алгоритам методе кишног тока са критеријумом четири тачке.

Основа методе према [2], је дефинисање тачака P_i , P_{i+1} , и P_{i+2} , које представљају локалне екстреме у низу тачака дужине N .

Након тога дефинишу се и опсези као алгебарска разлика вредности у тачкама i , $i+1$ и $i+2$. Уколико наведени опсег испуњава критеријум три тачке:

$$Y = |P_{i+1} - P_i| \leq X = |P_{i+2} - P_{i+1}|, \quad (1)$$

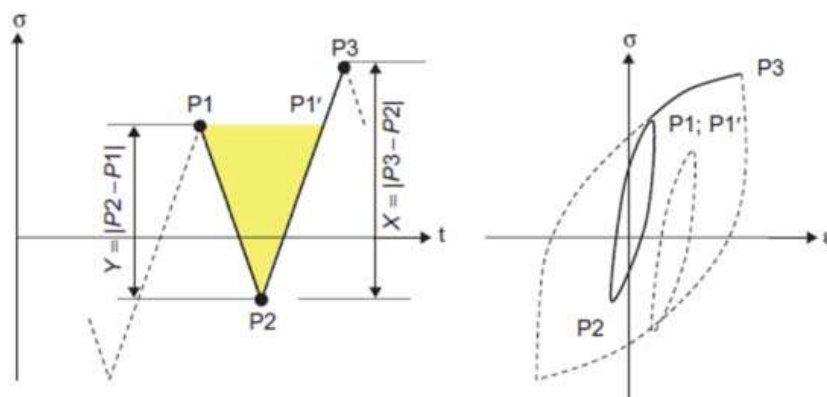
где је:

$i = 1, 2, 3, \dots, N-2$,

N - дужина разматране серије података,

дати опсег, формиран од вредности у тачкама P_i и P_{i+1} се складишти у меморију као пуни циклус, а затим брише из историје оптерећења. Настала празнина унутар историје оптерећења се попуњава повезивањем преосталих суседних тачака.

Поступак се наставља све док се не провери да ли све тачке испуњавају критеријум три тачке.



Слика 2. Метод кишног тока – критеријум 3 тачке

Након завршене екстракције пуних циклуса који задовољавају критеријум 3 тачке, неминовно се јавља остатак или резидуална историја оптерећења, која се мора додатно обрадити. У супротном би циклуси који садрже највећи опсег напона, били изостављени, што би довело до велике грешке при разматрању коначне акумулације оштећења. Резидуална историја оптерећења ће се јавити и код осталих алгоритама методе кишног тока.

Погодност поменутог алгоритма је томе што поседује и могућност препознавања полуциклуса, па се резидуална историја обрађује додатним проласцима алгоритма кроз њу, одакле се екстрактују преостали пуни циклуси и евентуално преостали полуциклуси..

Наведеним критеријумом се врши екстракција пуних циклуса услед унутрашњих хистерезисних петљи, пре него спољашњих. На основу чега се

може тврдити да је наведени алгоритам бољи од оригиналне методе кишног тока.

Комплетан алгоритам за одређивање броја циклуса, овом методом, према [3] приказан је на слици (4а).

3. МЕТОДА КИШНОГ ТОКА – КРИТЕРИЈУМ ЧЕТИРИ ТАЧКЕ

Као што је раније наведено, историја оптерећења се састоји из низа тачака које представљају локалне минимуме и локалне максимуме, који уједно представљају тачке у којима долази до промене знака оптерећења. Основа методе, према [2], је дефинисање тачке P_i која представља локални минимум или локални максимум у низу тачака дужине N , тако да је:

$$P_{m-1} > P_m < P_{m+1} \text{ или } P_{m-1} < P_m > P_{m+1}, \quad (2)$$

где је:

$$m = 2, 3, 4, \dots, N-1$$

Након тога дефинише се и опсег као алгебарска разлика вредности у тачкама $i+1$, $i+2$ и $i+3$. Уколико наведени опсег испуњава критеријум четири тачке:

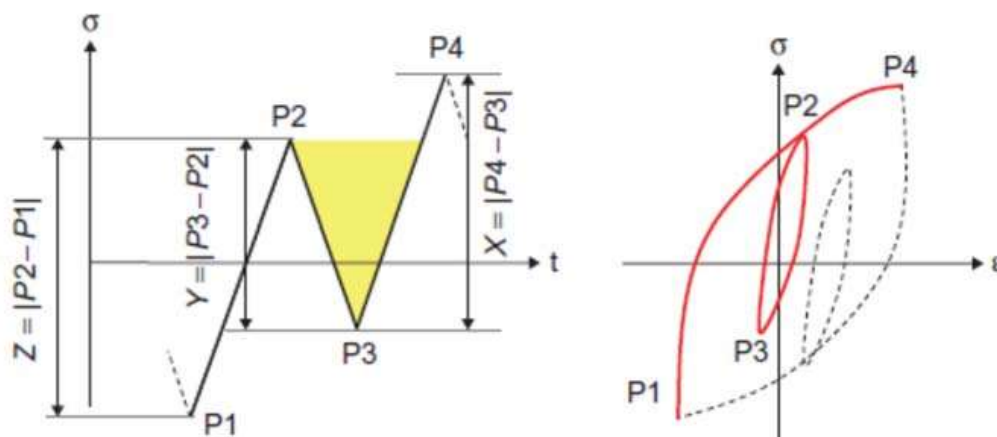
$$Z = |P_{i+1} - P_i| \geq Y = |P_{i+2} - P_{i+1}| \leq X = |P_{i+3} - P_{i+2}|, \quad (3)$$

где је:

$$i = 1, 2, 3, \dots, N-3,$$

N - дужина разматране серије података,

дати опсег, формиран од вредности у тачкама P_{i+1} и P_{i+2} се складишти у меморију као пуни циклус, а затим брише из историје оптерећења. Настала празнина унутар историје оптерећења се попуњава повезивањем суседних тачака P_i и P_{i+3} .

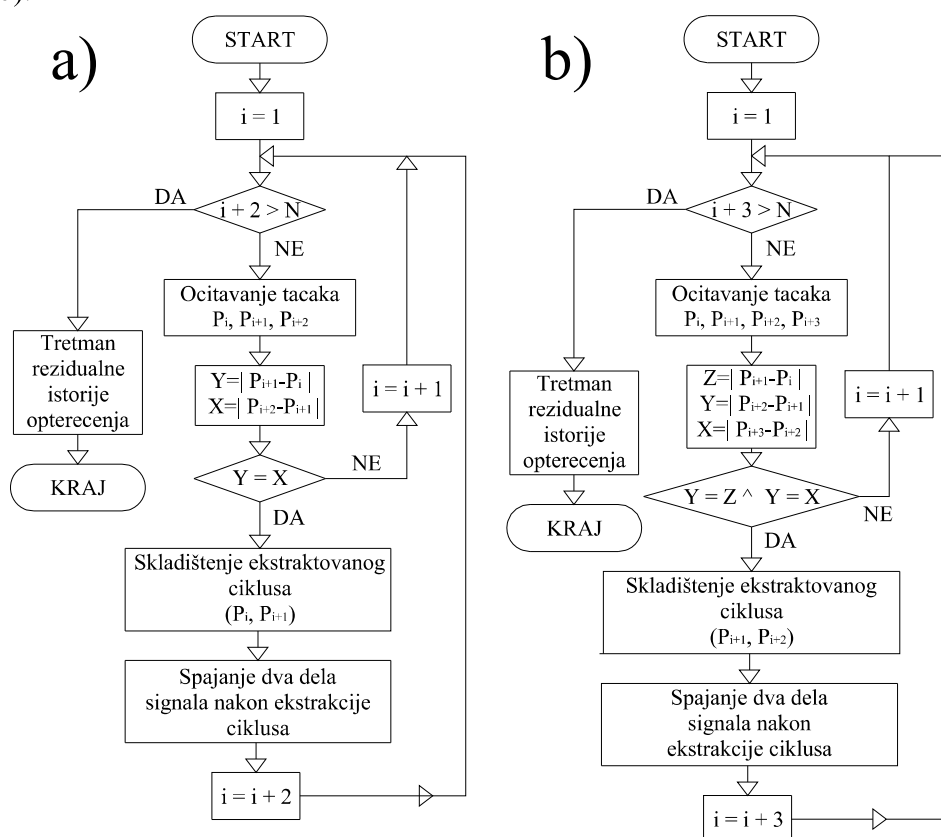


Слика 3. Метод кишног тока - критеријум 4 тачке

Поступак се наставља све док се не провери да ли све тачке испуњавају критеријум четири тачке.

Може се закључити да критеријум четири тачке, у односу на традиционални приступ методе кишног тока, има мањи остатак након завршеног процеса бројања циклуса. Међутим, одређени број естремума унутар историје оптерећења ипак остаје неупарен, односно непроцесуиран. Како би историја оптерећења била у потпуности представљена помоћу коначног броја пуних циклуса, развијено је више поступака за обраду „остатка“ након првог проласка бројања [4].

Комплетан алгоритам за одређивање броја циклуса, методом кишног тока, уз примену критеријума четири тачке, према [3], дат је на следећој слици (4b).



Слика 4. Алгоритам прорачуна методом кишног тока:
a) критеријум 3 тачке, b) критеријум 4 тачке

4. МЕТОДА КИШНОГ ТОКА – КРИТЕРИЈУМ ПЕТ ТАЧАКА

Сходно претходним разматрањима поменутих алгоритама, у овом поглављу дат је нови алгоритам који представља унапређење поменутог критеријума са 4 тачке.

Увођењем пете тачке у алгоритам знатно се унапређује поступак, скраћује време потребно за извршавање алгоритма уз задржавање истих корака, а уз прорачун само једног додатног опсега напона.

Основа методе је дефинисање тачака P_i , P_{i+1} , P_{i+2} , P_{i+3} , и P_{i+4} , које представљају локалне екстреме у низу тачака дужине N .

Након тога дефинишу се и опсези као алгебарска разлика вредности у тачкама $i+1$, $i+2$, $i+3$, и $i+4$. Проверава се да ли наведени опсег испуњава први критеријум пет тачака:

$$Z = |P_{i+1} - P_i| \geq Y = |P_{i+2} - P_{i+1}| \leq X = |P_{i+3} - P_{i+2}| \quad (4)$$

а уколико није испуњен, прелази се проверу следећег услова:

$$Y = |P_{i+2} - P_{i+1}| \geq X = |P_{i+3} - P_{i+2}| \leq W = |P_{i+4} - P_{i+3}| \quad (5)$$

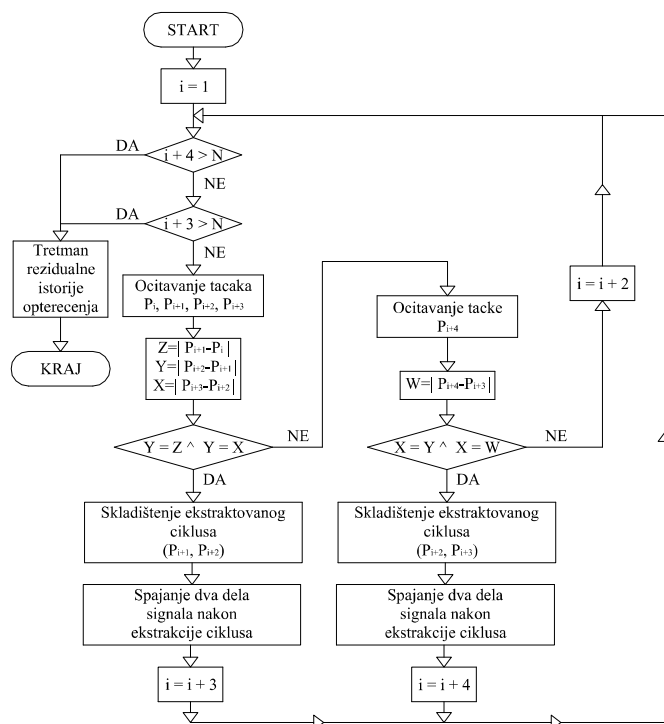
где је:

$i = 1, 2, 3, \dots, N-4$,

N - дужина разматране серије података,

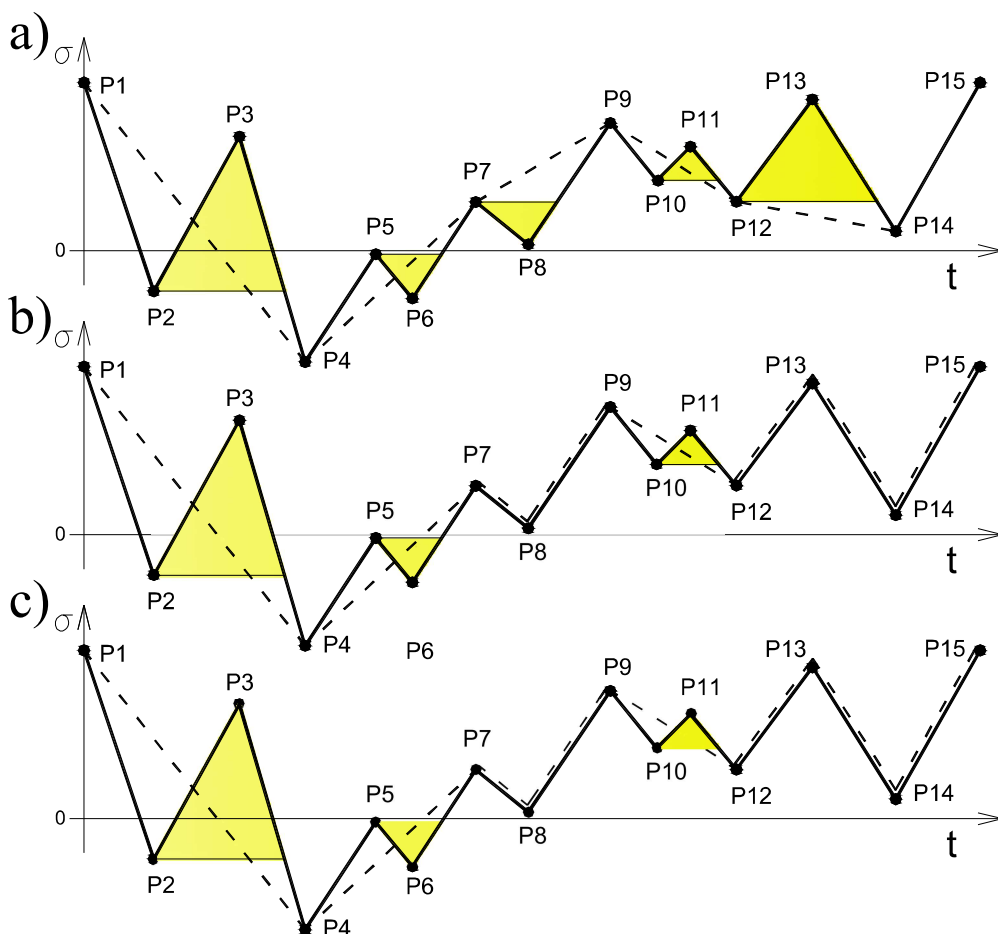
Након чега се опсег, формиран од вредности у тачкама P_{i+1} и P_{i+2} (задовољен израз (4)), или у тачкама P_{i+2} и P_{i+3} (задовољен израз (5)), складишти у меморију као пуни циклус, а затим брише из историје оптерећења. Настала празнина унутар историје оптерећења се попуњава повезивањем суседних тачака P_i и P_{i+3} (задовољен израз (4)), или тачака P_{i+1} и P_{i+4} (задовољен израз (5)).

Комплетан алгоритам за одређивање броја циклуса, методом кишног тока, уз примену критеријума пет тачака, дат је на следећој слици (5):



Слика 5. Алгоритам прорачуна са 5 тачака

Применом овог и претходних критеријума, на полазној историји оптерећења, могу се извући следећи циклуси:



Слика 6. Екстракција пуних циклуса из задате историје оптерећења: а) критеријум 3 тачке; б) критеријум 4 тачке; в) критеријум 5 тачака

Критеријум пет тачака представља унапређење критеријума са четири тачке, које се огледа у смањењу броја пролазака кроз алгоритам, што за директну последицу има смањење времена потребног за обраду података, уз задржавање тачности поступка.

5. ЗАКЉУЧАК

Кључни корак при анализи замора је одређивање броја циклуса са одговарајућим опсезима напона. Док је код историја оптерећења са константном амплитудом, тај задатак лак, историје са променљивом амплитудом, знатно отежавају екстракцију пуних циклуса

Иако, превазиђен, класичан метод кишног тока, први даје физички смисао затворене хистерезисне петље пуном циклусу. Главни недостатак се огледа у потреби за познавањем читаве историје оптерећења.

Дати приступ, као последицу има више алгоритама за одређивање броја циклуса који поседују могућност парцијалне обраде историје оптерећења и компјутерског програмирања.

Мада, критеријум четири тачке, који уз различите методе за третирање резидуалне историје, даје најбоље резултате и код одређивања броја циклуса, представља најпопуларнији алгоритам, предложени алгоритам пет тачака представља унапређење у погледу брзине анализе историје оптерећења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Matsuishi, M. and Endo, T., *Fatigue of metals subjected to varying stress. in proceedings of the Kyushu Branch of Japan Society of Mechanics Engineering*, Fukuoka, Japan (in Japanese), 1968.
- [2] Yung-Li Lee, Mark E. Barkey, Hong-Tae Kang, *Metal Fatigue Analysis Handbook (2011)*, Chapter 3 – Rainflow Cycle Counting Techniques.
- [3] C. Amzalag, J.P. Gerey, J.L. Robert, J. Bahuaud, *Standardization of rainflow counting method for fatigue analysis*, Internal Journal of Fatigue (1994), Volume 16, Issue 4, Pages 287-293.
- [4] Gabriel M., Colin W., *Review and application of Rainflow residue processing techniques for accurate fatigue damage estimation*, Internal Journal of Fatigue, volume 88, Part 3, January 2016, Pages 757–765.