

UTJECAJ VLASTITE FREKVENCije SABIRNICE PRIGODOM IZRAČUNAVANJA NAPREZANJA VODIČA I SILA NA IZOLATORE U VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA PREMA IEC 60865

Mr. sc. Borko Fr ü h w i r t h, Zagreb

UDK 621.316.35
STRUČNI ČLANAK

Predstavljen je proračun naprezanja krutih vodiča (cijevnih sabirnica) i sila na potporne izolatore u visokonaponskim postrojenjima prema IEC-u (IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3 [Struje kratkog spoja – proračun posljedica 1. dio] i IEC 60865-2 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 2, 1994-2 [Struje kratkog spoja – proračun posljedica 2. dio]).

Posebna pozornost je posvećena utjecaju vlastite frekvencije vodiča na izračunate veličine te su dane usporedbe veličina na stvarnim primjerima i teoretski ukoliko se vlastita frekvencija vodiča ne uzme u obzir te ako se njoj posveti pozornost. Pokazano je da su ukoliko se vlastita frekvencija ne uzima u obzir u slučaju visokonaponskih postrojenja s cijevnim sabirnicama izračunate vrijednosti i nekoliko puta veće od izračunatih s obzirom na vlastitu frekvenciju sabirnice.

Ključne riječi: proračun sabirnica, vlastita frekvencija.

1. UVOD

Sabirnički sustavi vanjskih elektroenergetskih postrojenja naponskih nivoa od 110 kV na više najčešće se izvode s cijevnim sabirnicama izrađenim od aluminij-
skih legura. U Hrvatskoj su u skladu s tim sva visokonaponska postrojenja od 1975. godine izrađena s cijevnim sabirničkim sustavima.

Sabirnički sustavi su tijekom svoje dugogodišnje eksploatacije izloženi osim temperaturnim i naponskim napreznjima, također i statičkim i dinamičkim mehaničkim napreznjima zbog sila koje djeluju na njih, a uzrokovane su vlastitom težinom, težinom priključaka, antivibracijskog užeta i leda, vjetra, potresa i kratkog spoja. Prigodom dimenzioniranja sabirničkog sustava projektantima stoje na raspolaganju različiti alati i postupci kojima se može s određenom točnošću izračunati napreznje sabirničkog sustava. Počevši od pojednostavljenih proračuna, koji ponekad mogu rezultirati i višekratnim predimenzioniranjem sustava, pa do suvremenih alata, koji omogućavaju modeliranje sabirničkog sustava metodom konačnih elemenata te vrlo točno izračunavanje napreznja, kako u cijevnim sabirnicama tako i u temeljima nosača sabirnica. Vrlo točni, a time i složeni proračuni, sa stanovišta projektiranja nisu optimalni, jer zahtijevaju veliki broj ulaznih podataka koji se većinom prigodom procesa projektiranja ne mogu pretpostaviti s dovoljnom točnošću da bi imalo smisla provoditi skup, složen i najčešće dugotrajan proračun. Uobičajeno je da se prigodom proračuna

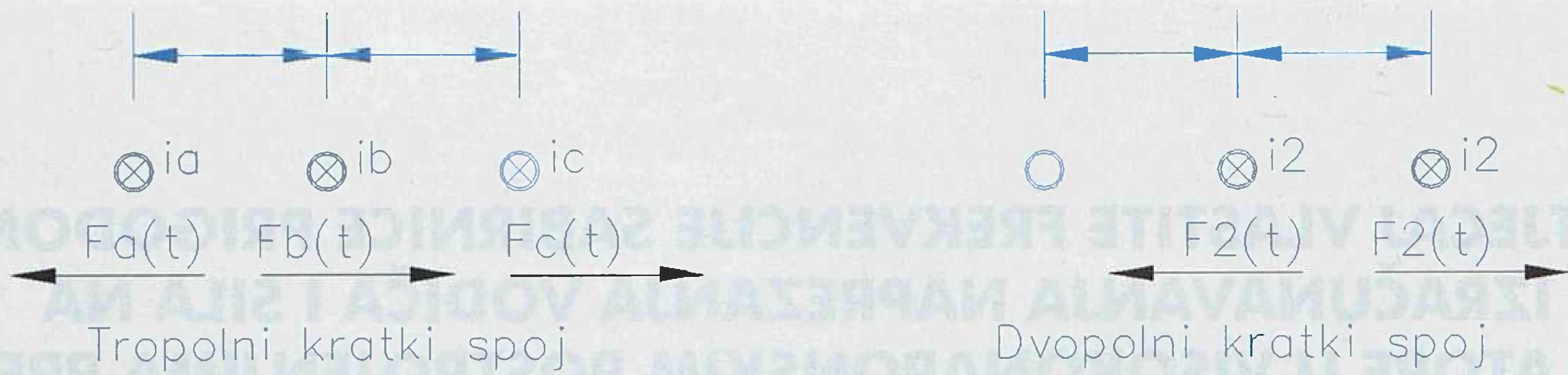
izračunavaju napreznja odvojeno jednostavnijim postupcima, te da se nakon dobivanja maksimalnih vrijednosti izračunava maksimalno vjerojatno i ekonomski opravdano napreznje koje se očekuje za vrijeme eksploatacije sabirničkog sustava. Tako se napreznja koja se pojavljuju prigodom kratkog spoja najčešće izračunavaju prema postupku koji je opisan u preporukama IEC-a (IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3 [Struje kratkog spoja – proračun posljedica 1. dio] i IEC 60865-2 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 2, 1994-2 [Struje kratkog spoja – proračun posljedica 2. dio] u daljnjem tekstu IEC 60865 odnosno L4 i L5).

2. PRORAČUN SABIRNIČKOG SUSTAVA S CIJEVNIM SABIRNICAMA PREMA IEC 60865 SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS

2.1. Uvod

U IEC-u 60865 dane su metode za proračun napreznja u krutim vodičima, vlačnih sila u vodičima od užeta, proračun sila na izolatore i nosače izolatora koji mogu biti opterećeni na savijanje, vlak i tlak, te proračun pomaka vodiča od užadi u slučaju kratkog spoja.

U nastavku će biti detaljno prikazan proračun napreznja sabirnica s krutim cijevnim vodičima za vrijeme kratkog spoja i to za sabirnički sustav kojem se osi vodiča nalaze u istoj ravnini i na istoj udaljenosti. Pri



Slika 1. Djelovanje sila uzrokovanih kratkim spojem na vodiče

tome će se razmatrati samo sabirnički sustavi koji se sastoje od jednog vodiča po fazi kakvi i jesu sabirnički sustavi u visokonaponskim postrojenjima.

2.2. Sile između vodiča za vrijeme trajanja kratkog spoja

Oko vodiča se zbog protjecanja struje formira magnetno polje. Ukoliko paralelno s tim vodičem postavimo drugi vodič kroz kojeg također protječe struja između njih će se javiti sile privlačenja, odnosno odbijanja, koje ovise o struji koja protječe kroz vodiče, njihovoj dužini i međusobnoj udaljenosti. U IEC-u 60865 obrađene su sile u paralelnim vodičima zbog protjecanja struja kratkog spoja kroz njih.

Ukoliko kroz paralelne vodiče, čija je dužina veća u odnosu na razmak između njih protječe struja sile koje djeluju na njih biti će kontinuirano raspoređena uzduž vodiča. Silu možemo iskazati izrazom:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a} \quad (1)$$

gdje su:

- i_1 i i_2 – Trenutne vrijednosti struja koje protječu kroz vodiče [A]
- l – Udaljenost između oslonca vodiča na osi vodiča [m]
- a – Udaljenost između osi vodiča [m].

Kada struje kroz vodiče teku u istom smjeru, između vodiča djeluju privlačne sile, a kada teku u suprotnom smjeru, onda djeluju odbojne sile.

2.2.1. Utjecaji na smanjenje naprezanja

Prigodom izračunavanja maksimalne struje kratkog spoja IEC 60865 upućuje na razmatranje drugih preporuka IEC-a ukoliko bi njihovom primjenom došlo do smanjenja izračunatog naprezanja u vodičima. S obzirom da je, u praksi, prigodom projektiranja postrojenja struja kratkoga spoja obično zadana temeljem predviđanja razvoja elektroenergetske mreže za vrijeme predvidljivog životnog vijeka postrojenja ova razmatranja u pravilu ne treba provoditi.

2.2.2. Utjecaj APU¹-a

Utjecaj automatskog ponovnog uklopa treba uzeti u obzir samo za krute vodiče ukoliko se primjenjuje tropolni automatski ponovni uklop.

2.3. Proračun elektromagnetskih sila na vodiče

2.3.1. Proračun najveće sile između vodiča za vrijeme trojednog kratkog spoja

U trofaznom sustavu kada su vodiči kojima je os u istoj ravnini smješteni na jednakoj udaljenosti kao što je prikazano na slici 1, a što je uobičajeni raspored sabirnice u visokonaponskim postrojenjima, najveće sile za vrijeme trojednog kratkog spoja djeluju na vodič smješten u sredini i dane su jednadžbom 2.

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

gdje su:

- i_{p3} – Udarana struja simetričnog trojednog kratkog spoja prema IEC 60909 [A]
- l – Maksimalna udaljenost između potpora vodiča na osi vodiča [m]
- a_m – Udaljenost između osi vodiča [m].

Napomena: Ova se jednadžba može koristiti i za proračun maksimalne sile između vodiča kružnog presjeka čije su osi smještene u vrhovima istostraničnog trokuta. U tom slučaju a_m je dužina stranice trokuta.

2.3.2. Proračun najveće sile između vodiča za vrijeme dvopjednog kratkog spoja

U trofaznom sustavu kada su vodiči kojima je os u istoj ravnini smješteni na jednakoj udaljenosti kao što je prikazano na slici 1 najveće sile koje djeluju na vodiče za vrijeme dvopjednog kratkog spoja dane su jednadžbom 3.

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

gdje su:

- i_{p2} – Udarana struja dvopjednog kratkog spoja prema IEC 60909 [A]

¹ APU – Automatski ponovni uklop (automatic reclosing)

- l – Maksimalna udaljenost između potpora vodiča na osi vodiča [m]
 a_m – Udaljenost između osi vodiča [m].

2.4. Proračun napreznja krutih vodiča i sile na potporne izolatore

2.4.1. Uvod

Vodiči mogu biti učvršćeni na potporne izolatore čvrsto (fiksno) ili klizno, odnosno u kombinaciji ta dva načina. Zbog mehaničkih napreznja koja se javljaju kao rezultat promjene dužine vodiča uslijed promjene njegove temperature jedan segment vodiča na kojem nije moguća temperaturna kompenzacija treba biti čvrsto vezan samo u jednoj točki. Napreznja u vodiču i sile na potporne izolatore bit će prigodom istih struja kratkog spoja različite u ovisnosti od tipa oslonca (stezaljke kojom je vodič učvršćen na potporni izolator). Jednadžbe za izračun napreznja u vodiču i sila na potporne izolatore uzimaju ovu činjenicu u obzir.

Napreznja u vodiču i sile na potporne izolatore također ovise o omjeru između vlastite frekvencije sabirničkog sustava koja ovisi o mehaničkim svojstvima sustava i nazivne frekvencije elektroenergetskog sustava. U slučaju rezonancije ili u slučaju bliskom rezonanciji napreznja u vodiču i sile na izolatore mogu se povećati, no ukoliko je $f_c / f < 0,5$ vrijednosti napreznja i sila padaju.

2.4.2. Proračun napreznja krutih vodiča

Uz pretpostavku da je vodič krut aksijalne sile se mogu zanemariti te se javlja samo napreznje na savijanje koje se može izračunati iz jednadžbe 4.

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_m l}{8 \cdot Z} \quad (4)$$

gdje su:

$V_\sigma V_r$ – Faktori koji ovise o tipu dinamičke pojave prema [4] (tablica 2 na strani 65; prenesena je iz [4] u izvornom obliku kao tablica 2 u ovom tekstu)²

V_r – Omjer napreznja vodiča ukoliko postoji trolpolni automatski uklop i ukoliko trolpolni automatski uklop ne postoji.

V_σ – Omjer dinamičkog i statičkog napreznja vodiča.

β – Faktor napreznja sabirnice - faktor koji ovisi o tipu i broju oslonaca vodiča prema [4] (tablica 3 na strani 67; prenesena je iz [4] u izvornom obliku kao tablica 1 u ovom tekstu)

l – Maksimalna udaljenost između potpora vodiča na osi vodiča [m]

F_m – F_{m2} ili F_{m3} iz jednadžbe 2 i 3, a ovisno o tome koji je kratki spoj mjerodavan za napreznje vodiča, odnosno za koji se kratki spoj napreznje izračunava [N]

Z – Moment otpora vodiča (za cijevne sabirnice $Z = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^3 \right]$);
gdje je d_1 [m] vanjski, a d_2 [m] unutarnji promjer cijevi) [m³].

Sabirnički sustavi s nejednakim razmacima između oslonaca na neprekinutom vodiču mogu se proračunavati na ovaj način sa zadovoljavajućom točnošću ukoliko se računa s najvećim razmakom između oslonaca. To podrazumijeva da:

- krajnji oslonci nisu izloženi većem napreznju od unutarnjih
- da se izbjegavaju rasponi manji od 20% od susjednih. Ukoliko to nije moguće vodič treba biti rastavljen i spojen elastičnom spojnicom na osloncu. Ukoliko se primijeni elastična spojnica na rasponu, dužina tog raspona može biti manje od 70% dužine susjednih raspona.

Ukoliko nije jasan karakter oslonca, odnosno stezaljke, treba se uzeti u obzir najnepovoljniji slučaj.

2.4.3. Proračun sila na oslonce krutih vodiča

Dinamička sila koja djeluje na oslonce krutih vodiča, a preko njih na potporne izolatore, ovisi o tipu oslonca vodiča (tip stezaljki) te tipu dinamičkog napreznja koje djeluje na vodič. Ta dinamička sila dana je jednadžbom 5.

$$F = V_F V_r \alpha F_m \quad (5)$$

gdje su:

$V_F V_r$ – Faktori koji ovise o tipu dinamičke pojave prema [4] (tablica 2 na strani 65; prenesena je iz [4] u izvornom obliku kao tablica 2 u ovom tekstu)³

V_F – Omjer dinamičke i statičke sile na oslonac (potporni izolator).

V_r – Omjer napreznja vodiča ukoliko postoji trolpolni automatski uklop i ukoliko trolpolni automatski uklop ne postoji.

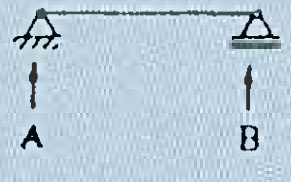
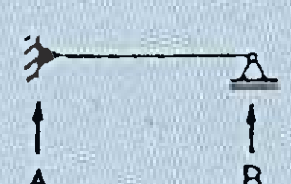

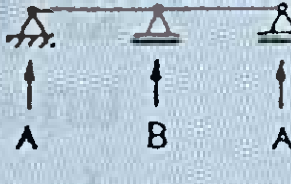
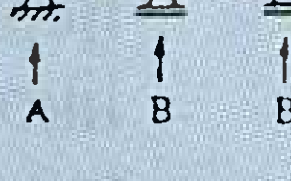
α – Faktor napreznja sabirnice - faktor koji ovisi o tipu oslonca vodiča prema [4] (tablica 3 na strani 67; prenesena je iz [4] u izvornom obliku kao tablica 1 u ovom tekstu)

F_m – F_{m2} ili F_{m3} iz jednadžbe 2 i 3, a ovisno o tome koji je kratki spoj mjerodavan za napreznje vodiča, odnosno za onaj kratki spoj za koji se sila izračunava [N].

² Faktori za točan proračun određeni su prema L 4) (slika 4 i slika 5 na stranici 79 i 81).

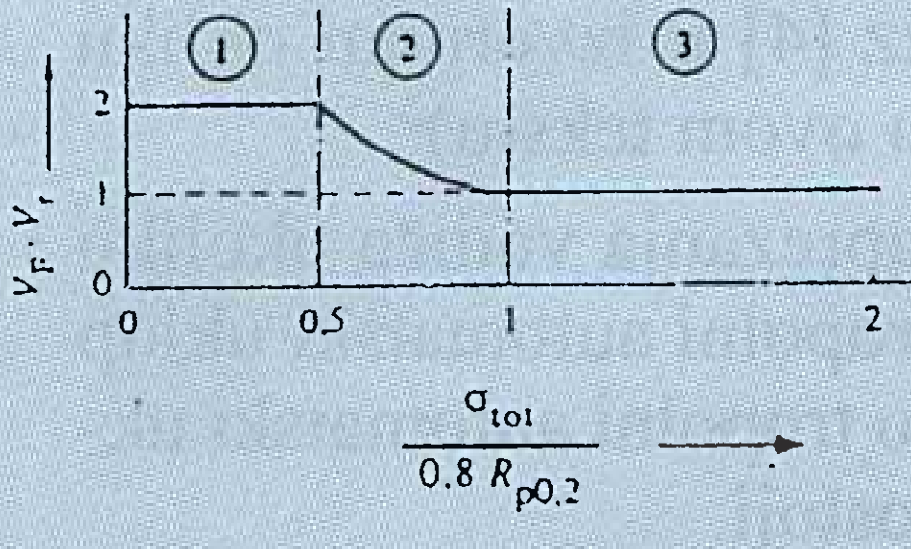
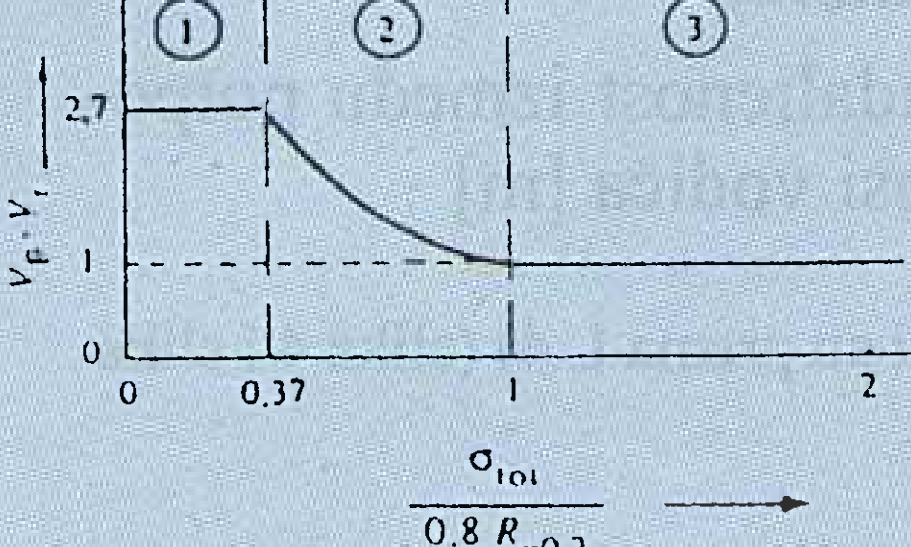
³ Faktori za točan proračun određeni su prema L 4) (slika 4 i slika 5 na stranici 79 i 81).

Tablica 1. Faktori α , β i γ za različite konfiguracije potpora sabirnice (tablica je preuzeta u izvornom obliku iz IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3; tablica 3 na strani 67)

| Type of beam and support | | Factor α | Factor β^* | Factor γ |
|--|---|----------------------|------------------|-----------------|
| Single span beam | A and B: simple supports  | A: 0.5 B: 0.5 | 1.0 | 1.57 |
| | A: fixed support B: simple support  | A: 0.625 B: 0.375 | 0.73 | 2.45 |
| | A and B: fixed supports  | A: 0.5 B: 0.5 | 0.5 | 3.56 |
| Continuous beam with equidistant simple supports | Two spans  | A: 0.375 B: 1.25 | 0.73 | 2.45 |
| | Three or more spans  | A: 0.4 B: 1.1 | 0.73 | 3.56 |

* Plasticity effects included

Tablica 2. Maksimalno moguće vrijednosti za faktore $V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}$, V_{rs} i V_FV_r (tablica je preuzeta u izvornom obliku iz IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3; tablica 2 na strani 65)

| Type of short circuit | System | | |
|-----------------------|---|---------------------------------------|--|
| | Without three-phase automatic reclosing | With three-phase automatic reclosing | With and without three-phase automatic reclosing |
| | $V_{\sigma}V_r, V_{\sigma s}, V_{rs}$ | $V_{\sigma}V_r, V_{\sigma s}, V_{rs}$ | V_FV_r |
| line-to-line | 1.0 | 1.8 | <p>2.0 for $\frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}} \leq 0.5$ (1)</p> <p>$\frac{0.8 R_{p0.2}}{\sigma_{tot}}$ for $0.5 < \frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}} < 1.0$ (2)</p> <p>1.0 for $1.0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}}$ (3)</p>  |
| three-phase | 1.0 | 1.8 | <p>2.7 for $\frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}} \leq 0.370$ (1)</p> <p>$\frac{0.8 R_{p0.2}}{\sigma_{tot}}$ for $0.370 < \frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}} < 1.0$ (2)</p> <p>1.0 for $1.0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0.8 R_{p0.2}}$ (3)</p>  |

2.4.4. Proračun pri kojem se u obzir uzima titranje vodiča

Jednadžbe u poglavljima 2.4.2 i 2.4.3 ne uzimaju u obzir titrajnu prirodu naprezanja i sila na oslonce za vrijeme kratkog spoja. Faktori V_F , V_r i V_σ uzeti iz tablica navedenih u tim poglavljima prema literaturi L4 predstavljaju maksimalne vrijednosti. Ukoliko se uzme u obzir vlastita frekvencija vodiča f_c dozvoljena je i uporaba nižih vrijednosti.

Vlastita frekvencija vodiča izračunava se prema IEC 60865 iz jednadžbe 6.

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (6)$$

gdje su:

- γ – Faktor koji ovisi o tipu oslonca vodiča prema L4 (tablica 3 na strani 67; prenesena je iz L 4) u izvornom obliku kao tablica 1 u ovom tekstu)
- l – Maksimalna udaljenost između oslonaca vodiča [m]
- m' – Jedinična masa sabirnice [kg/m]
- E – Young-ov modul [N/m²]
- J – Aksijalni moment tromosti (za cijevne sabirnice

$$J = \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right] ;$$

gdje je d_1 [m] vanjski, a d_2 [m] unutarnji promjer cijevi) [m⁴].

Faktori V_F , V_r i V_σ mogu se na osnovi poznavanja vlastite frekvencije vodiča, odnosno omjera vlastite frekvencije vodiča i nazivne frekvencije elektroenergetskog sustava odrediti prema L 4) (slika 4 odnosno slika 5 na stranama 79 i 81; grafikoni su preuzeti iz L 4) u izvornom obliku i prikazani na slikama 2 i 3). Kao što je vidljivo iz grafikona na faktor V_F se razlikuje u ovisnosti o tome da li promatramo trolejni ili dvopolni kratki spoj. Razlika postoji na intervalu $1,2 \leq f_c / f \leq 2,74$. Faktori V_F , V_r i V_σ ovise također i o mehaničkim prigušenjima titranja vodiča uslijed priključaka aparata, antivibracijskog užeta, izvedbe stezaljki i dr., ali se navedeno zbog složenosti ne uzima u obzir.

U poglavlju 3. "Ovisnost izračunatih naprezanja vodiča i sila na oslonce o vlastitoj frekvenciji vodiča" prikazano je kroz niz proračuna na realnim sabirničkim sustavima kako ovise izračunata naprezanja vodiča i sile na potporne izolatore o vlastitoj frekvenciji sabirničkog sustava.

Potrebno je napomenuti da je na ovaj način izračunata vlastita frekvencija vodiča f_c samo procjena stoga što

ona ovisi o mnogim faktorima koje nije moguće obuhvatiti proračunom. U IEC 60865 su posebno napomenute dvije stvari:

- Trajanje kratkog spoja T_k ispod ili jednako 0,1 znatno smanjuje naprezanje sabirničkog sustava ukoliko je $f_c / f \leq 1$.
- U slučaju elastičnih oslonaca vlastita frekvencija je niža nego što se dobije njenim izračunavanjem u skladu s jednadžbom 6. Ovo treba uzeti u obzir kada se određuju faktori V_F , i V_σ ukoliko je $f_c / f > 2,4$ zbog toga što prema grafikonu na slici 2 u tom području V_F raste s padanjem omjera f_c / f .

2.4.5. Dozvoljeno naprezanje cijevnih sabirnica

Dozvoljeno naprezanje cijevnih sabirnica dano je jednadžbom 7.

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_m l}{8 \cdot Z} \leq q R_{p0,2} \quad (7)$$

gdje su:

- q – Faktor koji ovisi o presjeku cijevne sabirnice L 4) (tablica 4 na strani 69)

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2s}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2s}{D}\right)^4} ;$$

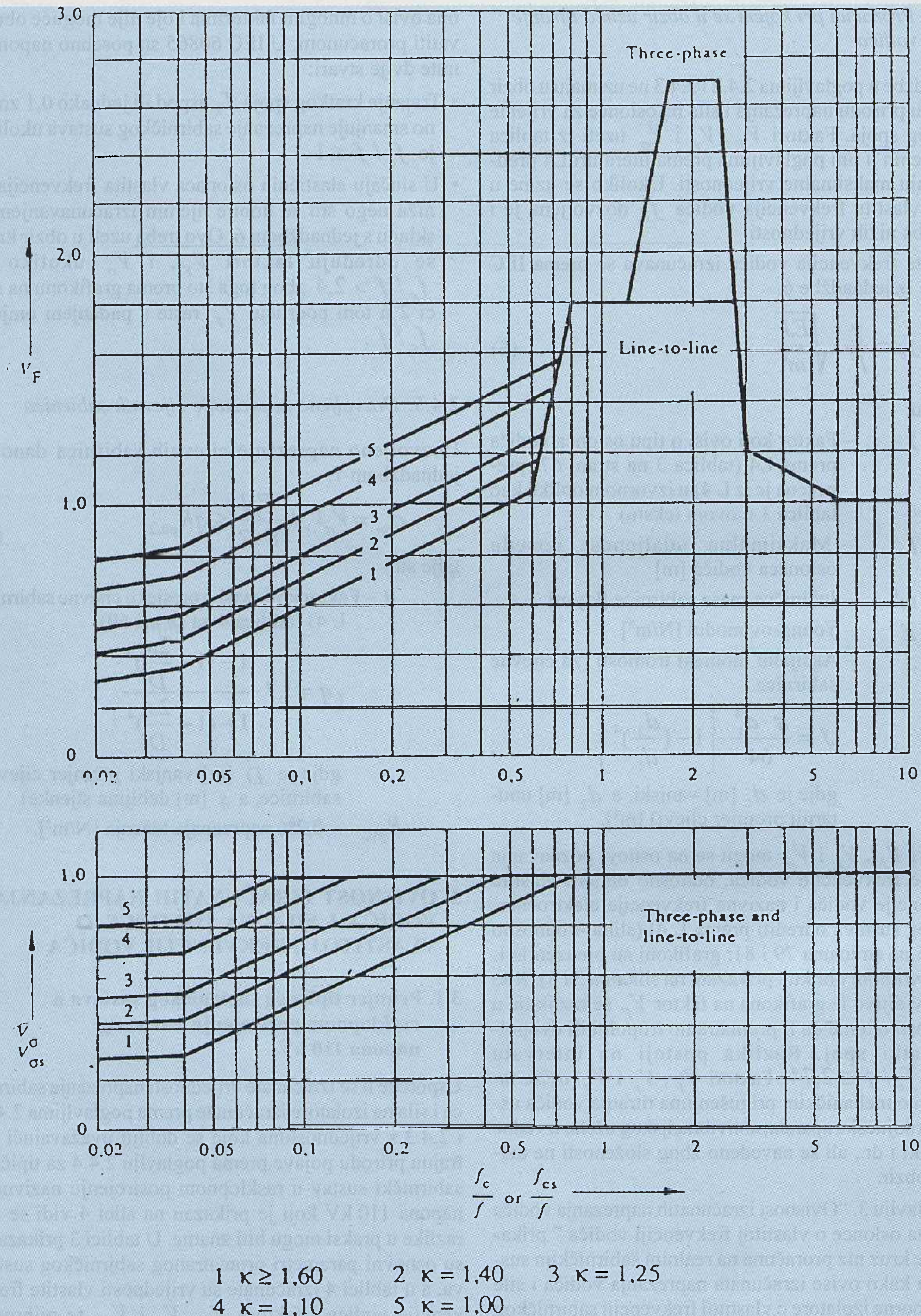
gdje je D [m] vanjski promjer cijevne sabirnice, a s [m] debljina stjenke)

$R_{p0,2}$ – 0,2% naprezanja tečenja [N/m²].

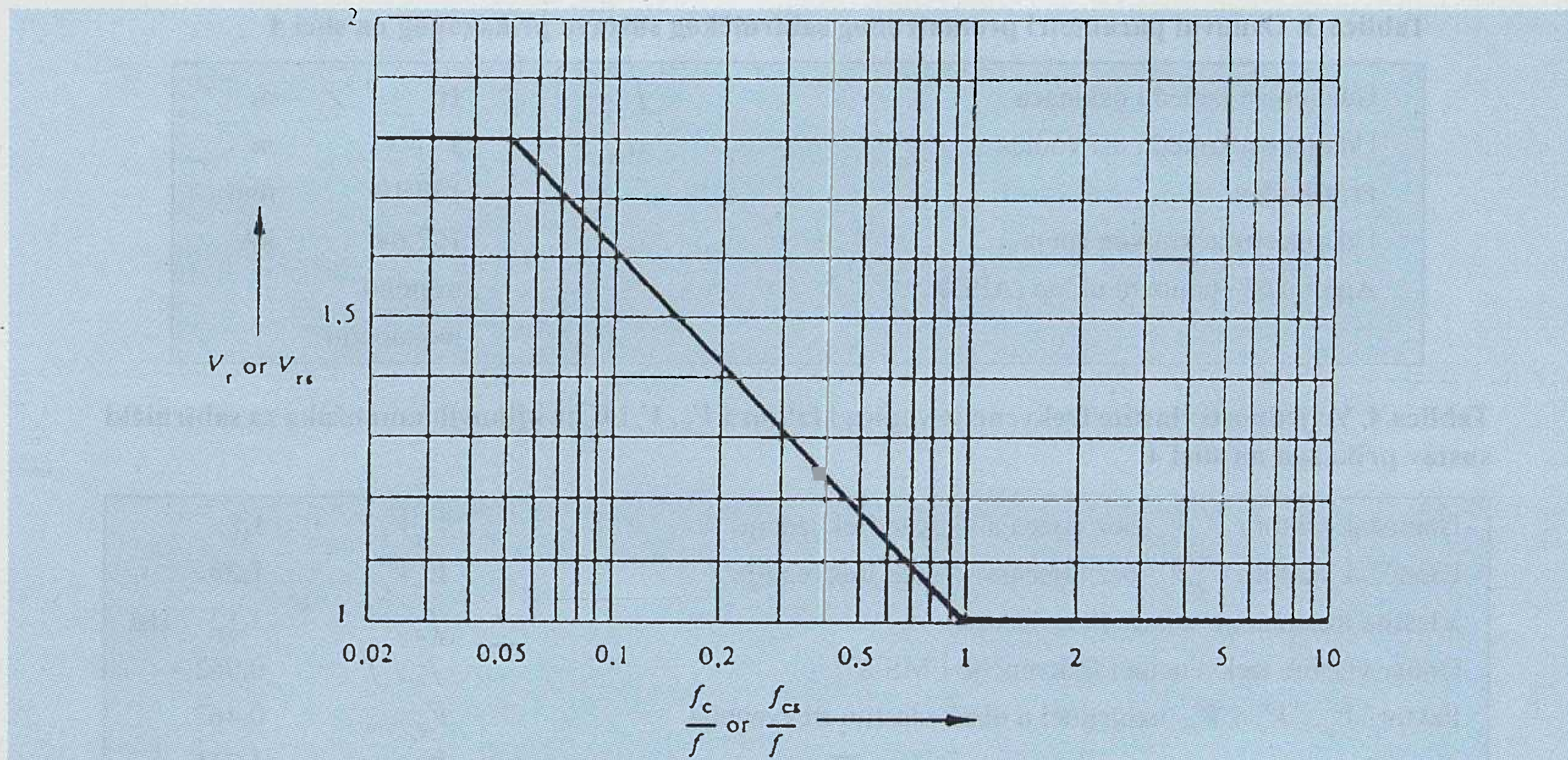
3. OVISNOST IZRAČUNATIH NAPREZANJA VODIČA I SILA NA OSLONCE O VLASTITOJ FREKVENCiji VODIČA

3.1. Primjer tipičnog sabirničkog sustava u rasklopnom postrojenju nazivnog napona 110 kV

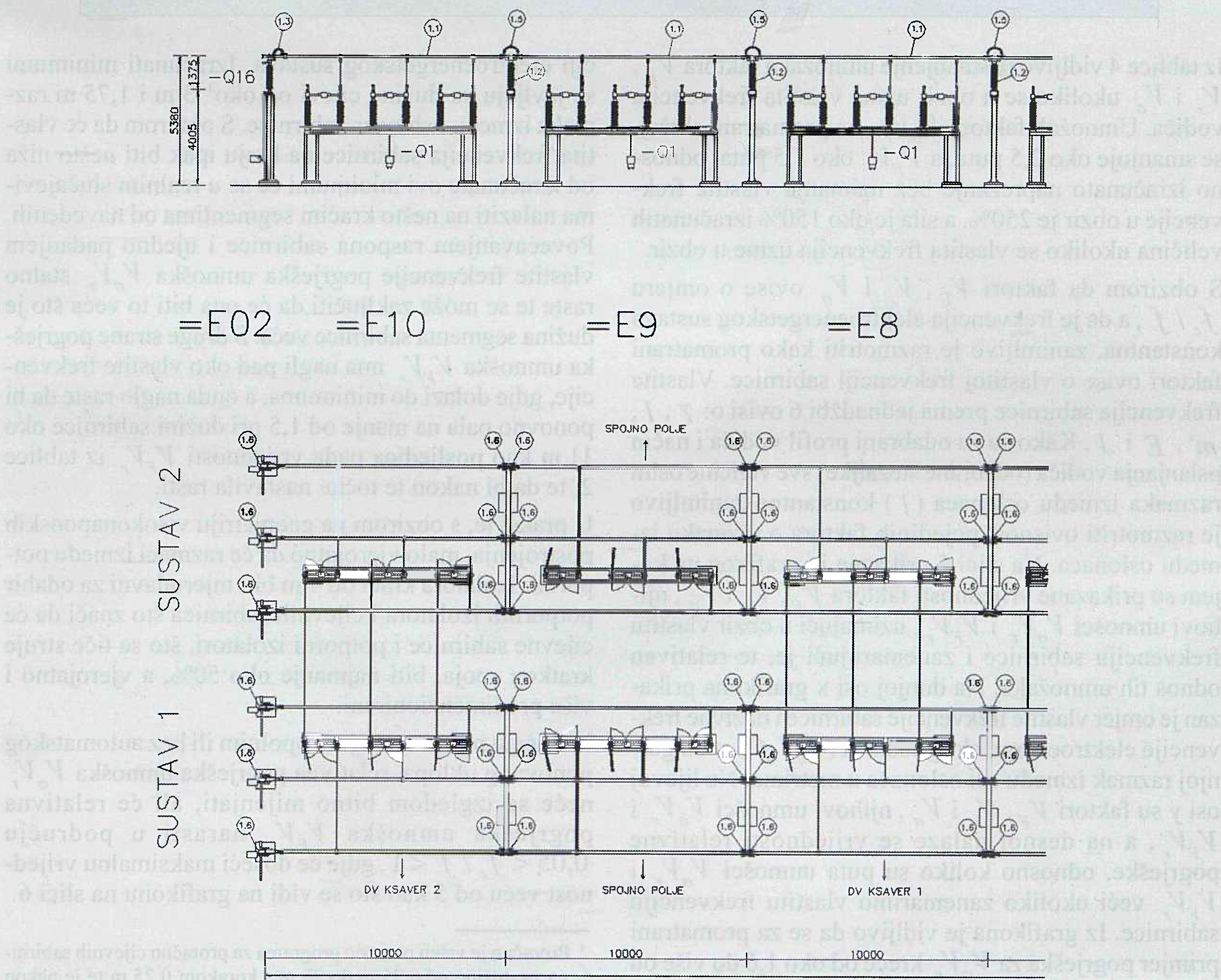
Usporede li se izračunate vrijednosti naprezanja sabirnica i sila na izolatore izračunate prema poglavljima 2.4.2 i 2.4.3 s vrijednostima koje se dobiju uvažavajući titrajnu prirodu pojave prema poglavlju 2.4.4 za tipičan sabirnički sustav u rasklopnom postrojenju nazivnog napona 110 kV koji je prikazan na slici 4 vidi se da razlike u praksi mogu biti znatne. U tablici 3 prikazani su osnovni parametri promatranog sabirničkog sustava, a u tablici 4 izračunate su vrijednosti vlastite frekvencije vodiča i faktora V_F , V_r i V_σ , te njihovih umnožaka. Faktori u umnošci izračunati su uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju vodiča i uz njeno zanezanje.



Slika 2. Ovisnost faktora V_{σ} , $V_{\sigma s}$ i V_F o omjeru vlastite frekvencije sabirničkog sustava i nazivne frekvencije (grafikon je preuzet u izvornom obliku iz IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3; slika 4 na strani 79)



Slika 3. Ovisnost faktora V_r i V_{rs} o omjeru vlastite frekvencije sabirničkog sustava i nazivne frekvencije (grafikon je preuzet u izvornom obliku iz IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-3; slika 2 na strani 81)



Slika 4. Prikaz dijela sabirničkog sustava 110 kV u TS 110/20 kV Dubec

Tablica 3. Osnovni parametri promatranog sabirničkog sustava prikazanog na slici 4

| | | | |
|--------------------------------|----------|------------------------|----|
| Udaljenost između oslonaca | l | 10 | m |
| Udaljenost između osi vodiča | a_m | 3 | m |
| Profil cijevi | | 120/10 | mm |
| Udarna struja kratkog spoja | i_{p3} | 102,64 | kA |
| Automatski ponovni uklop (APU) | | tropolni jednopolni | |

Tablica 4. Vrijednosti vlastite frekvencije vodiča i faktora V_F , V_r i V_σ te njihovih umnožaka za sabirnički sustav prikazan na slici 4

| | | | |
|---|----------------|-------|----|
| Umnožak faktora $V_\sigma V_r$ bez utjecaja vlastite frekvencije | $V_\sigma V_r$ | 1,8 | |
| Umnožak faktora $V_F V_r$ bez utjecaja vlastite frekvencije | $V_F V_r$ | 1,23 | |
| Vlastita frekvencija sabirničkog sustava | f_c | 3,12 | Hz |
| Omjer vlastite frekvencije i frekvencije EMS-a | f_c / f | 0,062 | |
| Faktori V_F , V_r i V_σ uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju | V_F | 0,462 | |
| | V_r | 1,741 | |
| | V_σ | 0,411 | |
| | $V_\sigma V_r$ | 0,715 | |
| | $V_F V_r$ | 0,80 | |

Iz tablice 4 vidljivo je smanjenje umnožaka faktora V_F , V_r i V_σ ukoliko se u obzir uzme vlastita frekvencija vodiča. Umnožak faktora $V_\sigma V_r$, za promatrani slučaj, se smanjuje oko 2,5 puta, a $V_F V_r$ oko 1,5 puta, odnosno izračunato naprezanje bez uzimanja vlastite frekvencije u obzir je 250%, a sila je oko 150% izračunatih veličina ukoliko se vlastita frekvencija uzme u obzir.

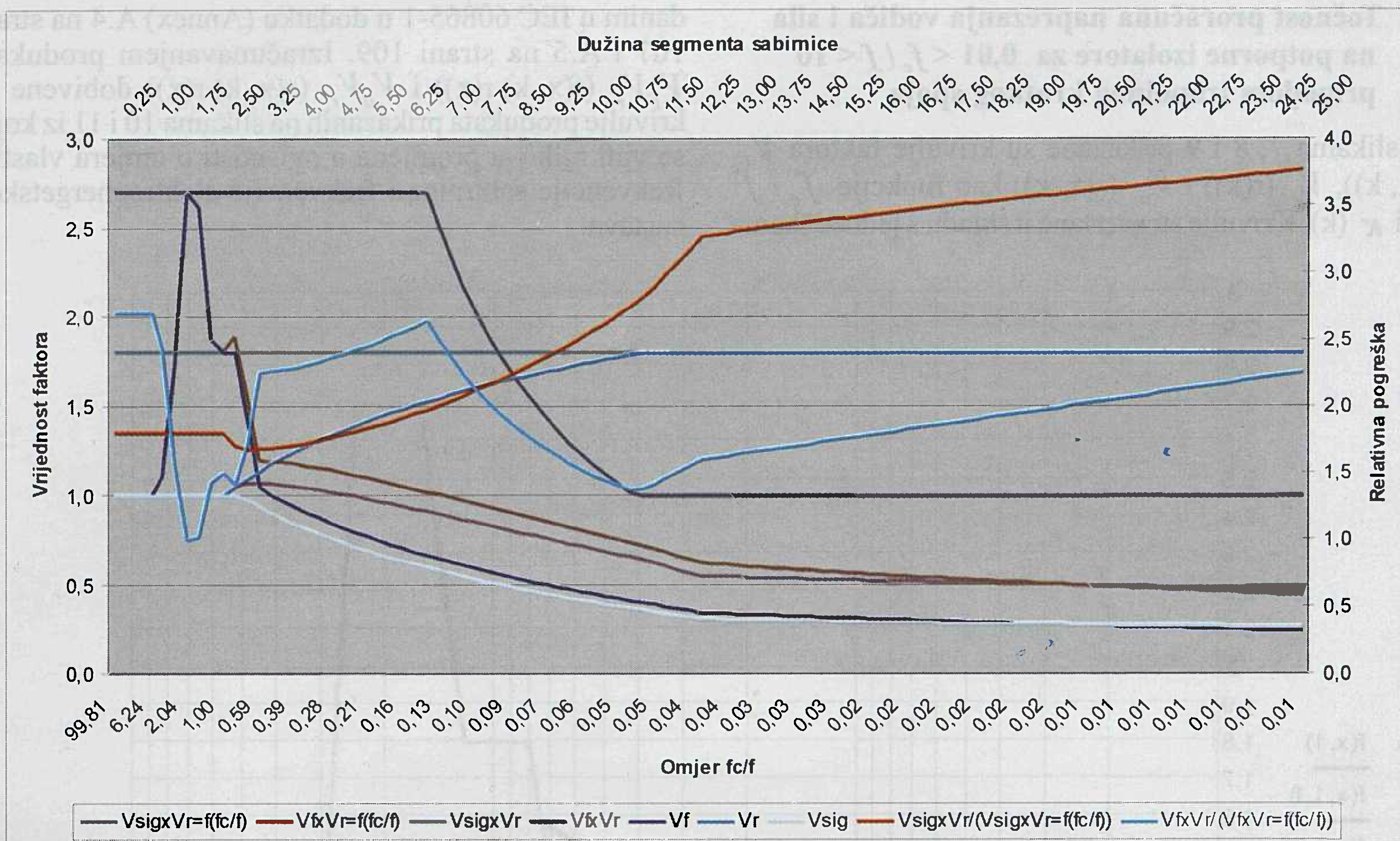
S obzirom da faktori V_F , V_r i V_σ ovise o omjeru f_c / f , a da je frekvencija elektroenergetskog sustava konstantna, zanimljivo je razmotriti kako promatrani faktori ovise o vlastitoj frekvenciji sabirnice. Vlastita frekvencija sabirnice prema jednadžbi 6 ovisi o: γ , l , m' , E i J . Kako su za odabrani profil vodiča i način oslanjanja vodiča (odabrane stezaljke) sve veličine osim razmaka između oslonaca (l) konstantne zanimljivo je razmotriti ovisnost pojedinih faktora o razmaku između oslonaca. Na slici 5 prikazan je grafikon na kojem su prikazane vrijednosti faktora V_F , V_r i V_σ , njihovi umnošci $V_\sigma V_r$ i $V_F V_r$, uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju sabirnice i zanemarujući je, te relativan odnos tih umnožaka. Na donjoj osi x grafikona prikazan je omjer vlastite frekvencije sabirnice i nazivne frekvencije elektroenergetskog sustava (f_c / f), a na gornjoj razmak između osi oslonaca u metrima. Na lijevoj osi y su faktori V_F , V_r i V_σ , njihovi umnošci $V_\sigma V_r$ i $V_F V_r$, a na desnoj nalaze se vrijednosti relativne pogreške, odnosno koliko su puta umnošci $V_\sigma V_r$ i $V_F V_r$ veći ukoliko zanemarimo vlastitu frekvenciju sabirnice. Iz grafikona je vidljivo da se za promatrani primjer pogreška za $V_\sigma V_r$ kreće od oko 1,6 do više od 3,7 puta, a za $V_F V_r$ 1 do više od 2,2 puta. Najmanja pogreška je kad je vlastita frekvencija bliska frekven-

ciji elektroenergetskog sustava. Izračunati minimumi se javljaju za dužine cijevi od oko⁴ 3 m i 1,75 m razmaka između oslonaca sabirnice. S obzirom da će vlastita frekvencija sabirnice na kraju ipak biti nešto niža od izračunate ovi minimumi će se u realnim slučajevima nalaziti na nešto kraćim segmentima od navedenih. Povećavanjem raspona sabirnice i ujedno padanjem vlastite frekvencije pogreška umnoška $V_\sigma V_r$ stalno raste te se može zaključiti da će ona biti to veća što je dužina segmenta sabirnice veća. S druge strane pogreška umnoška $V_F V_r$ ima nagli pad oko vlastite frekvencije, gdje dolazi do minimuma, a onda naglo raste da bi ponovno pala na manje od 1,5 pri dužini sabirnice oko 11 m kao posljedica pada vrijednosti $V_F V_r$ iz tablice 2, te da bi nakon te točke nastavila rasti.

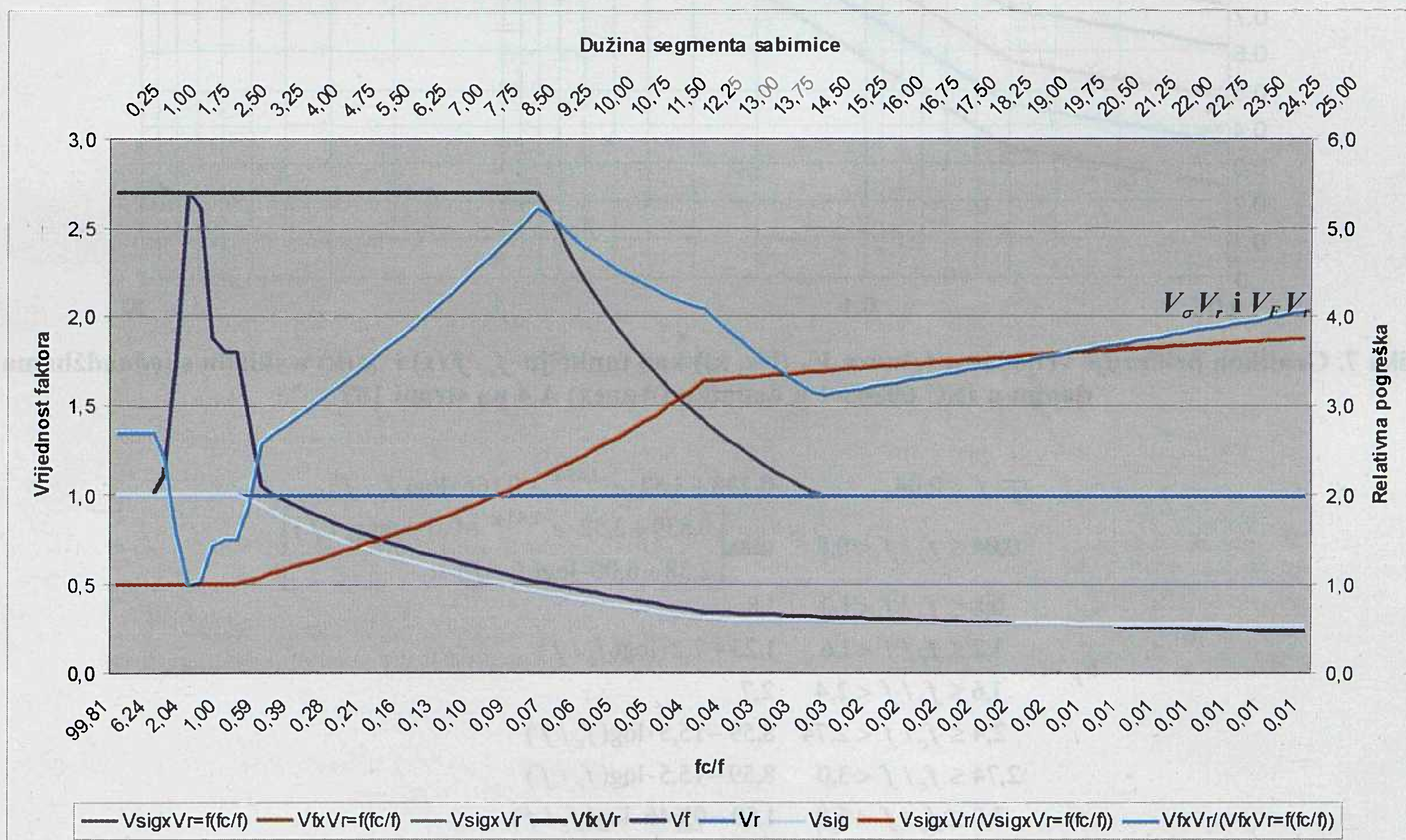
U praksi je, s obzirom na geometriju visokonaponskih postrojenja, malo vjerojatno da će razmaci između potpornih izolatora kraći od 4 m biti mjerodavni za odabir potpornih izolatora i cijevnih sabirnica što znači da će cijevne sabirnice i potporni izolatori, što se tiče struje kratkog spoja, biti najmanje oko 50%, a vjerojatno i više predimenzionirani.

U slučaju proračuna s jednopolnim ili bez automatskog ponovnog uklopa, relativna pogreška umnoška $V_\sigma V_r$ neće se izgledom bitno mijenjati, ali će relativna pogreška umnoška $V_F V_r$ narasti u području $0,05 < f_c / f < 1$, gdje će doseći maksimalnu vrijednost veću od 5 kao što se vidi na grafikonu na slici 6.

⁴ Proračun je vršen pomoću programa za proračun cijevnih sabirnica za dužine od 0,25 m do 25 m s korakom 0,25 m te je nakon toga nađen minimum izračunatih vrijednosti. Stvaran minimum se nalazi u intervalu od $\pm 0,25$ m od navedene vrijednosti.



Slika 5. Za promatrani slučaj prikazane vrijednosti faktora V_F , V_r i V_{σ} , njihovi umnoški $V_{\sigma}V_r$ i V_FV_r , uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju sabirnice i zanemarujući je, te relativan odnos tih umnožaka u ovisnosti o dužini segmenta sabirnice s trolpolnim APU-om

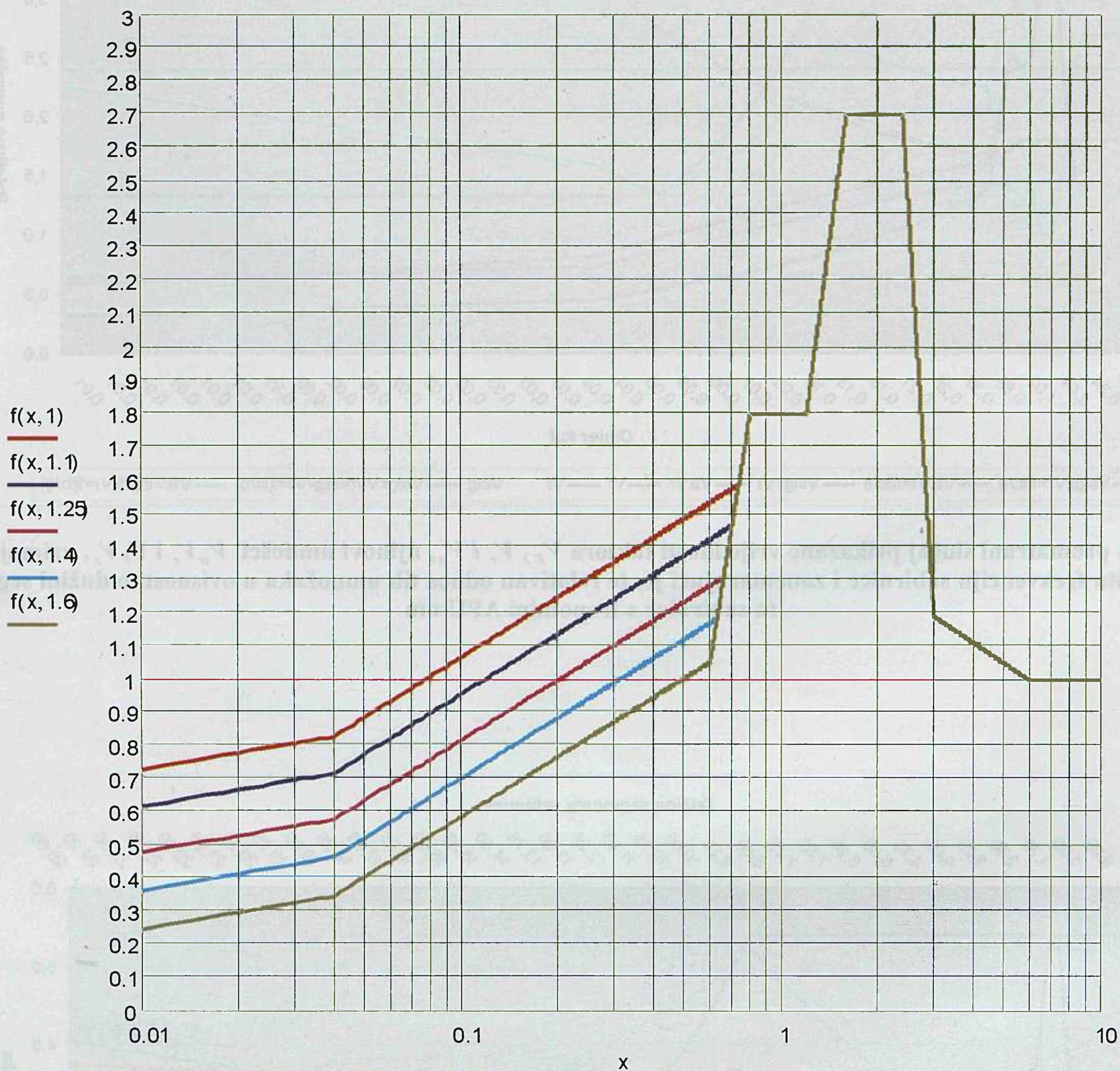


Slika 6. Za promatrani slučaj prikazane vrijednosti faktora V_F , V_r i V_{σ} , i, njihovi umnoški $V_{\sigma}V_r$ i V_FV_r , uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju sabirnice i zanemarujući je, te relativan odnos tih umnožaka u ovisnosti o dužini segmenta sabirnice s jednopolnim APU-om ili bez APU-a

3.2. Točnost proračuna naprežanja vodiča i sila na potporne izolatore za $0,01 < f_c / f < 10$ prigodom trolnog kratkog spoja

Na slikama 7, 8 i 9 prikazane su krivulje faktora V_F ($f(x, k)$), V_r ($r(x)$) i V_σ ($s(x, k)$) kao funkcije f_c / f (x) i κ (k). Krivulje su nacrtane u skladu s jednadžbama

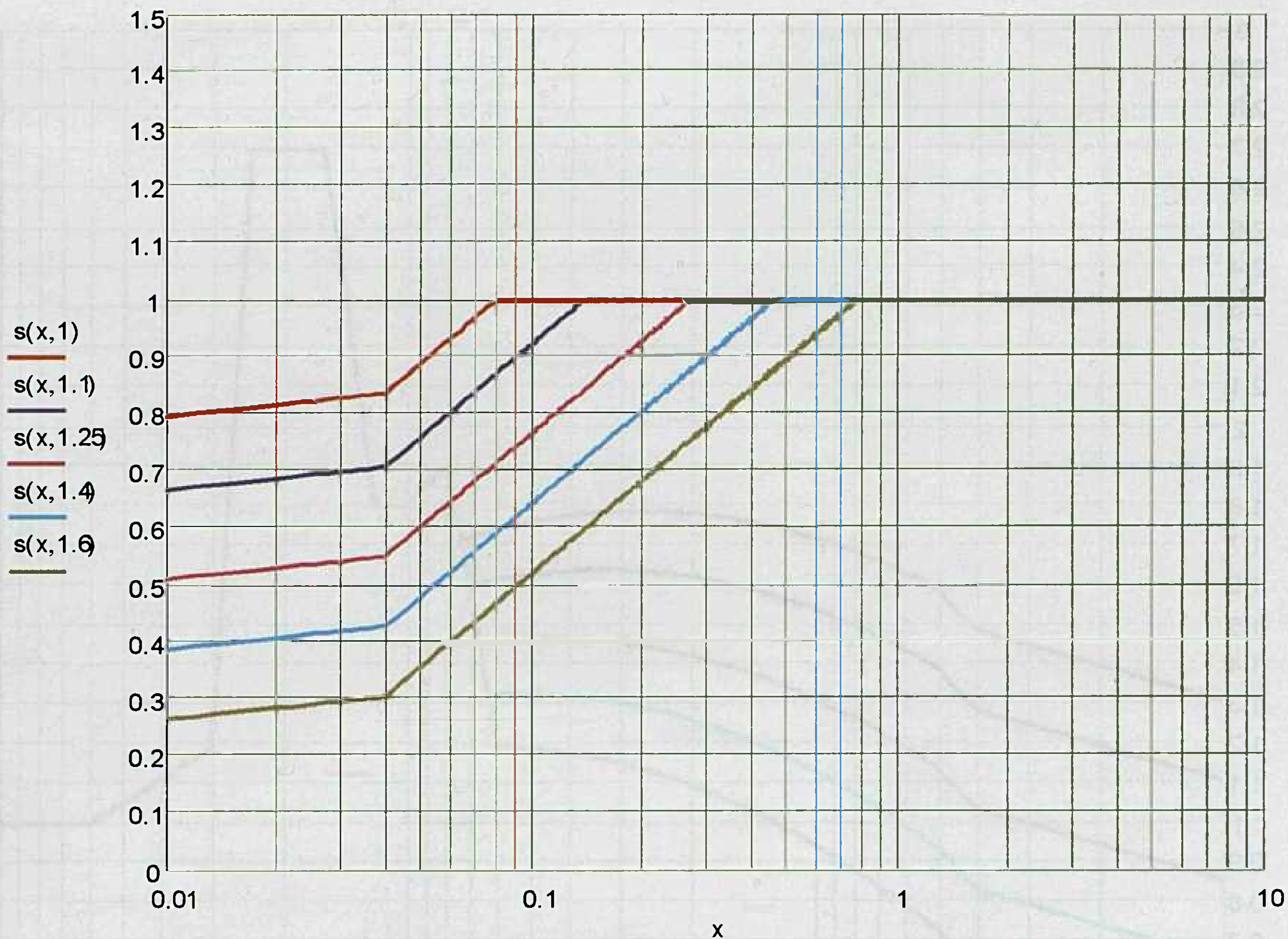
danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.4 na strani 107 i A.5 na strani 109. Izračunavanjem produkata $V_F V_r$ ($f(x, k) r(x)$) i $V_\sigma V_r$ ($s(x, k) r(x)$) dobivene su krivulje produkata prikazanih na slikama 10 i 11 iz kojih se vidi njihova promjena u ovisnosti o omjeru vlastite frekvencije sabirnice i frekvencije elektroenergetskog sustava.



Slika 7. Grafikon prikazuje vrijednost faktora V_F ($f(x, k)$) kao funkciju f_c / f (x) i κ (k) u skladu s jednadžbama danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.4 na strani 107

| | |
|---------------------------|---|
| $f_c / f < 0,04$ | $0,232 + 3,52 \cdot e^{-1,45 \cdot \kappa} + 0,166 \cdot \log(f_c / f)$ |
| $0,04 \leq f_c / f < 0,8$ | $\max \left[\begin{array}{l} 0,839 + 3,52 \cdot e^{-1,45 \cdot \kappa} + 0,6 \cdot \log(f_c / f) \\ 2,38 + 6,00 \cdot \log(f_c / f) \end{array} \right]$ |
| $0,8 \leq f_c / f < 1,2$ | 1,8 |
| $1,2 \leq f_c / f < 1,6$ | $1,23 + 7,2 \cdot \log(f_c / f)$ |
| $1,6 \leq f_c / f < 2,4$ | 2,7 |
| $2,4 \leq f_c / f < 2,74$ | $8,59 - 15,5 \cdot \log(f_c / f)$ |
| $2,74 \leq f_c / f < 3,0$ | $8,59 - 15,5 \cdot \log(f_c / f)$ |
| $3,0 \leq f_c / f < 6,0$ | $1,50 - 0,646 \cdot \log(f_c / f)$ |
| $6,0 \leq f_c / f$ | 1 |

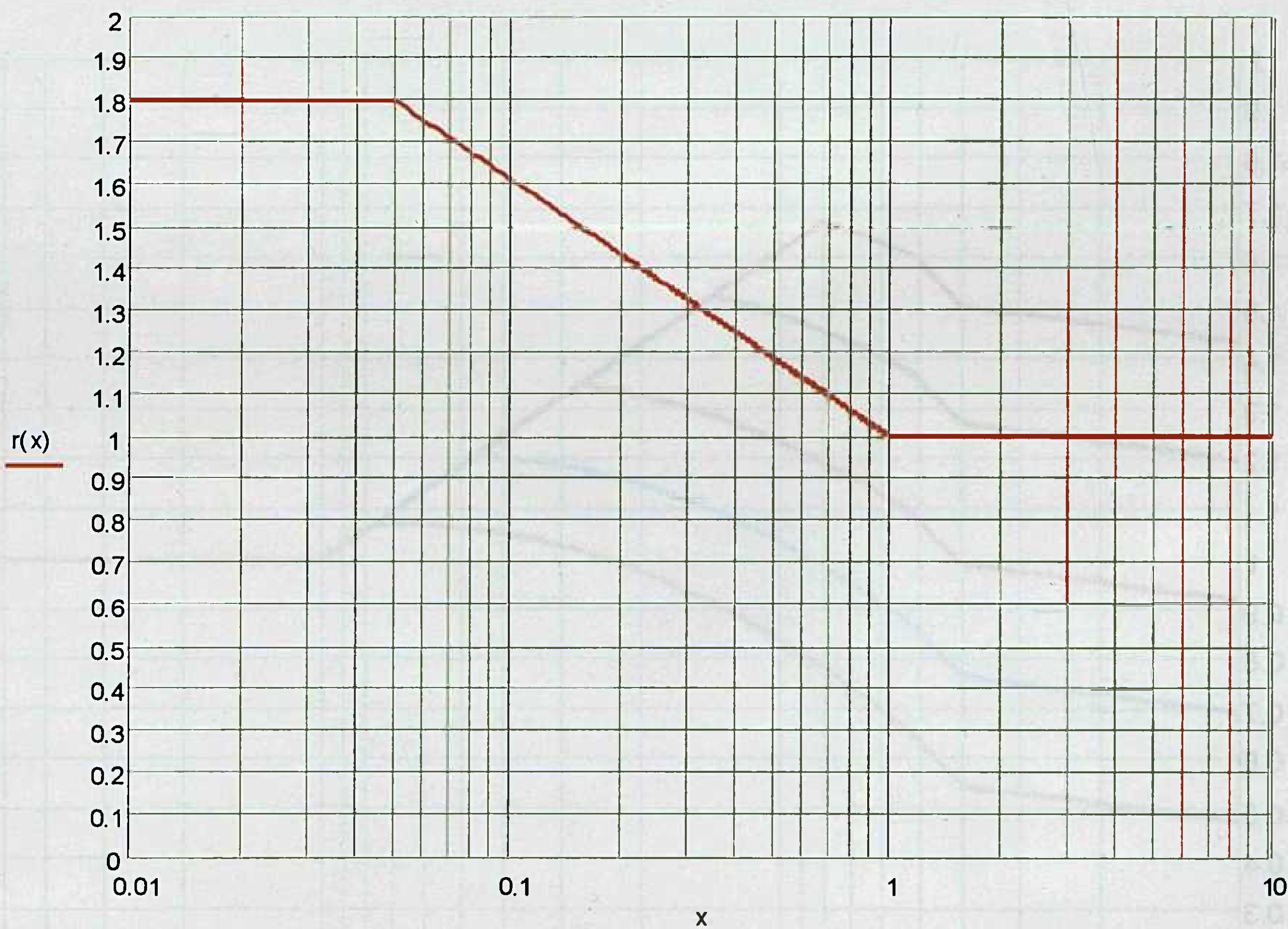
Ako je $\kappa > 1,6$ onda treba računati s $\kappa = 1,6$



Slika 8. Grafikon prikazuje vrijednost faktora V_σ ($s(x, k)$) kao funkciju $f_c/f(x)$ i $\kappa(k)$ u skladu s jednažbama danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.4 na strani 107

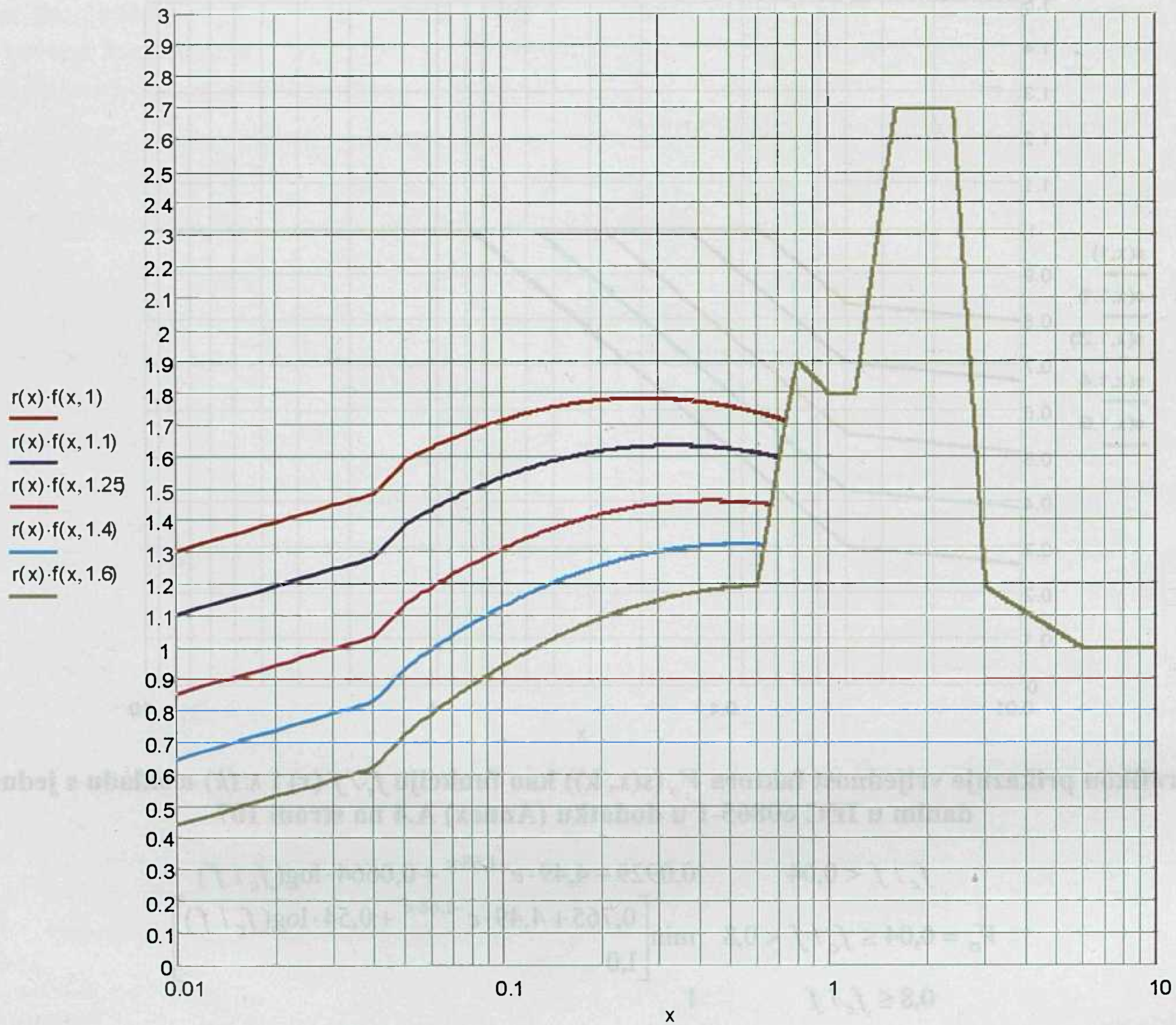
$$V_\sigma = \begin{cases} f_c/f < 0,04 & 0,0929 + 4,49 \cdot e^{-1,68 \cdot \kappa} + 0,0664 \cdot \log(f_c/f) \\ 0,04 \leq f_c/f < 0,8 & \min \left[\begin{array}{l} 0,765 + 4,49 \cdot e^{-1,68 \cdot \kappa} + 0,54 \cdot \log(f_c/f) \\ 1,0 \end{array} \right] \\ 0,8 \leq f_c/f & 1 \end{cases}$$

Ako je $\kappa > 1,6$ onda treba računati s $\kappa = 1,6$

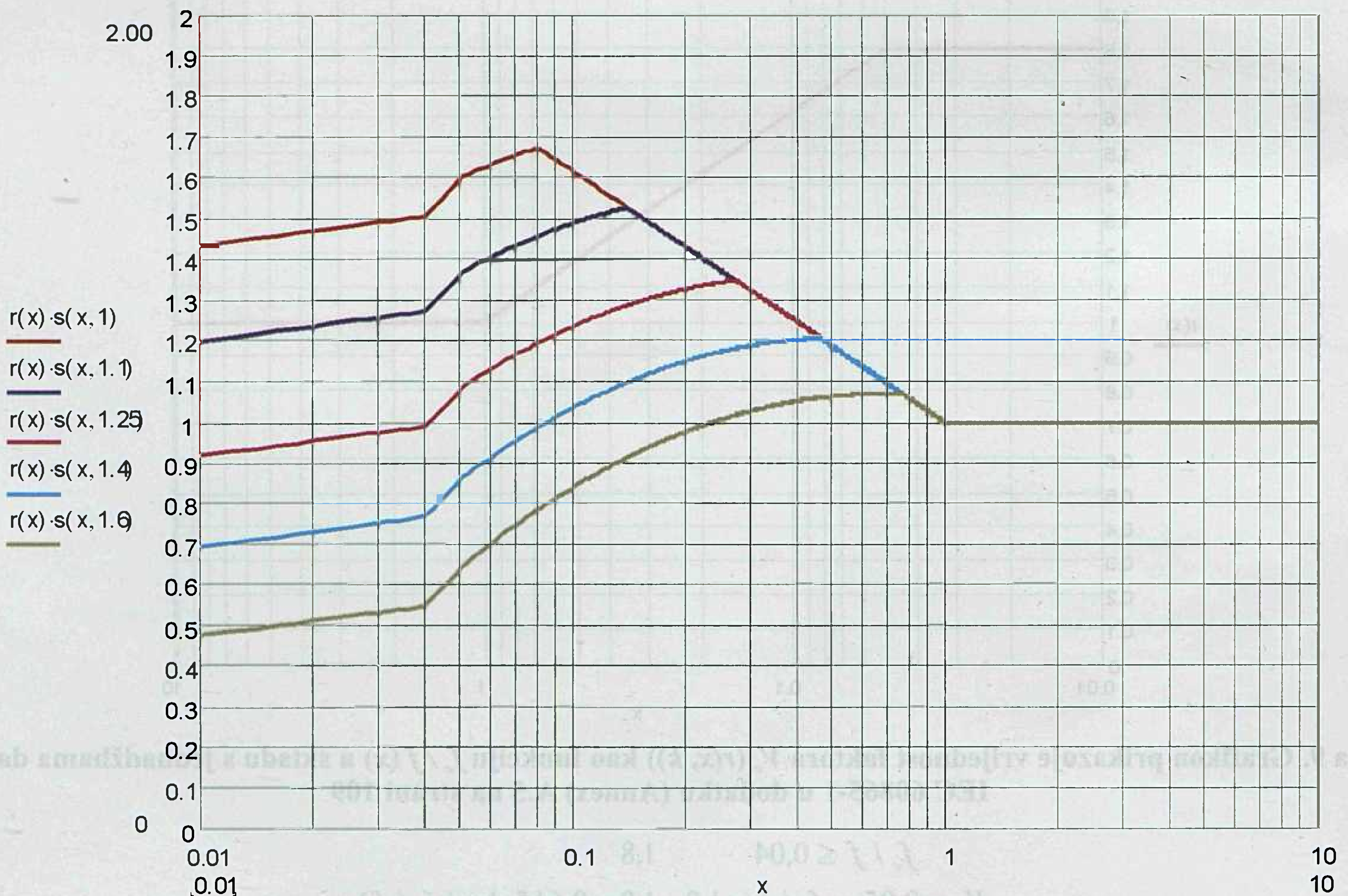


Slika 9. Grafikon prikazuje vrijednost faktora V_r ($r(x, k)$) kao funkciju $f_c/f(x)$ u skladu s jednažbama danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.5 na strani 109

$$V_r = \begin{cases} f_c/f \leq 0,04 & 1,8 \\ 0,05 < f_c/f < 1,0 & 1,0 - 0,615 \cdot \log(f_c/f) \\ 1,0 \leq f_c/f & 1 \end{cases}$$



Slika 10. Grafikon prikazuje produkt $V_F V_r (f(x, k) r(x))$ kao funkciju $f_c / f(x)$ u skladu s jednačbama danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.4 i A.5 na stranama 107 i 109



Slika 11. Grafikon prikazuje produkt $V_\sigma V_r (s(x, k) r(x))$ kao funkciju $f_c / f(x)$ u skladu s jednačbama danim u IEC 60865-1 u dodatku (Annex) A.4 i A.5 na stranama 107 i 109

Ukoliko usporedimo vrijednosti iz tablice 2 za umnožak faktora $V_\sigma V_r$, sa slikama 10 i 11, očito je da su vrijednosti, koje se dobivaju uzimanjem vlastite frekvencije u obzir, znatno manje na gotovo cijelom frekventnom opsegu. Pri vrlo malim vlastitim frekvencijama vodiča moguće je i trostruko predimenzioniranje cijevnih sabirnica, a što je u skladu i s prethodno obrađenim primjerom. Na slici 12 prikazane su relativne pogreške proračuna umnožaka faktora $V_\sigma V_r$, u ovisnosti o vlastitoj frekvenciji vodiča. Grafikon je zbog jednostavnosti napravljen samo za slučaj trolinog automatskog ponovnog uklopa za vrijednosti $\kappa = 1; 1,1; 1,25; 1,4$ i $1,6$, a za slučaj bez trolinog automatskog ponovnog uklopa za vrijednosti $\kappa = 1,6$ (tanka linija).

Prigodom razmatranja faktora V_F , i V_σ i njihovih umnožaka treba uzeti u obzir da se tipična vrijednost za κ u visokonaponskim elektroenergetskim mrežama kreće oko 1,8. Prema IEC-u u slučaju da je $\kappa > 1,6$ uzima se vrijednost za κ vrijednost 1,6, te se s tom vrijednosti ulazi u proračun faktora. S obzirom da je to u razmatranim slučajevima u pravilu tako za faktore V_F , i V_σ i njihove umnoške vrijedi krivulja s najnižim vrijednostima, te je shodno tome odstupanje na gornjoj granici.

Za umnožak faktora $V_F V_r$ nije tako jednostavno zaključiti da je uvijek manji ukoliko se uzima u obzir vlastita frekvencija sabirnice zbog toga što on ovisi o:

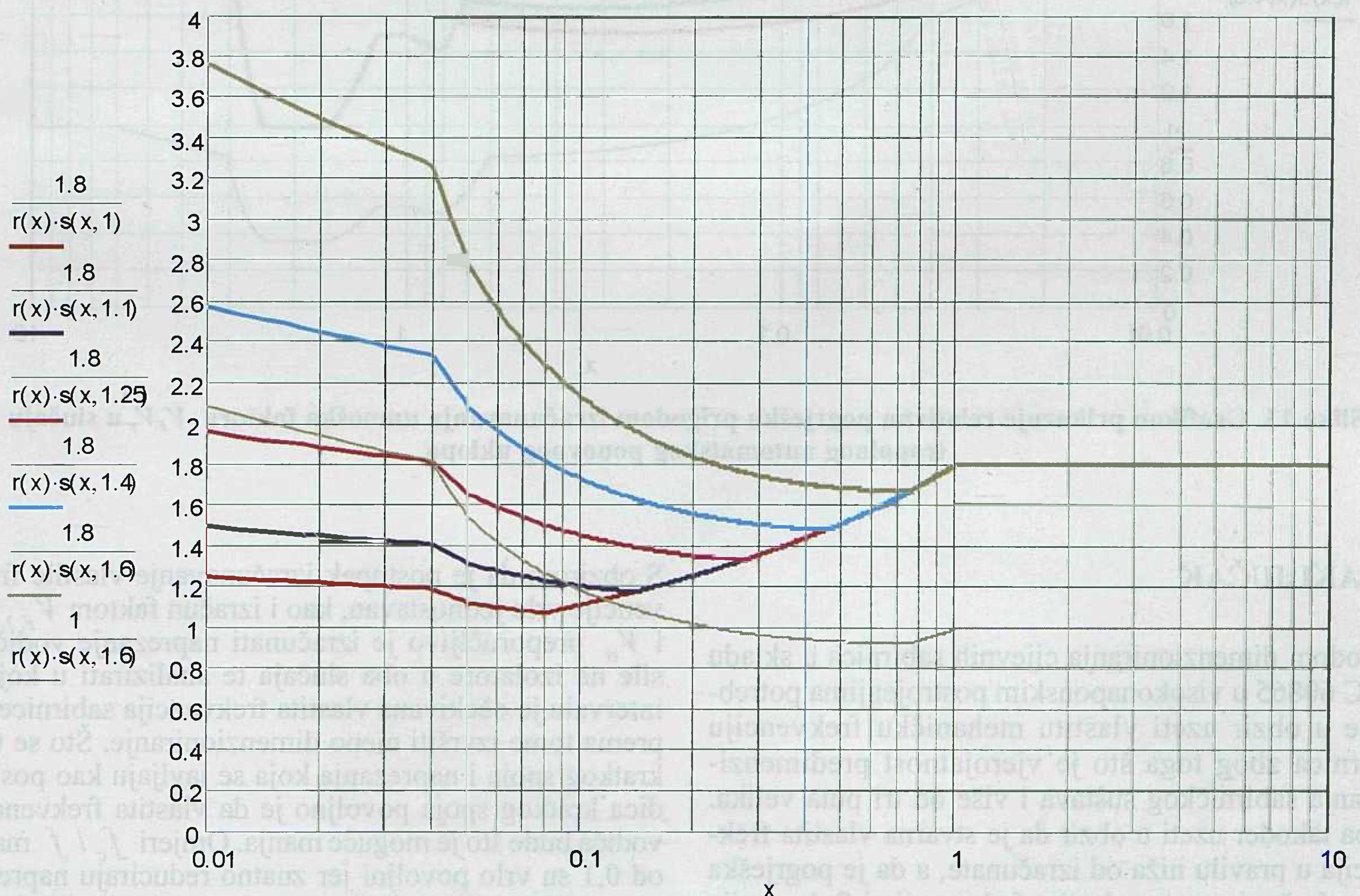
$$\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$$

gdje su:

σ_{tot} – Maksimalno naprezanje sabirnice u našem slučaju $\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s$, gdje je σ_s naprezanje koje djeluje zbog međudjelovanja pojedinih vodiča u snopu ukoliko se sabirnica sastoji od više paralelnih vodiča. U slučaju visokonaponskih postrojenja, kakva se ovdje razmatraju to nije slučaj, te je $\sigma_{tot} = \sigma_m$.

$R_{p0,2}$ – 0,2% naprezanja tečenja

Uzmemo li u obzir krivulje za $\kappa \geq 1,6$ vidi se da je umnožak $V_F V_r$ manji od jedan za f_c / f manje od 0,1, a da raste do 1,2 ako je $f_c / f = 0,6$. Uvrstimo li vrijednost 1,2 za umnožak faktora $V_F V_r$ u tablicu 2 proizlazi da bi prema pojednostavljenom proračunu to značilo da je $\sigma_{tot} = 0,96 \cdot R_{p0,2}$. Premda naprezanje ostaje u granicama dozvoljenog prema IEC 60865 ono je vrlo visoko i u praksi nije vjerojatno da će sabirnički sustav u visokonaponskom postrojenju s obzirom na geometriju sabirničkog sustava biti dimenzioniran s tako visokim vrijednostima naprezanja vodiča i tako visokom vlastitom frekvencijom.



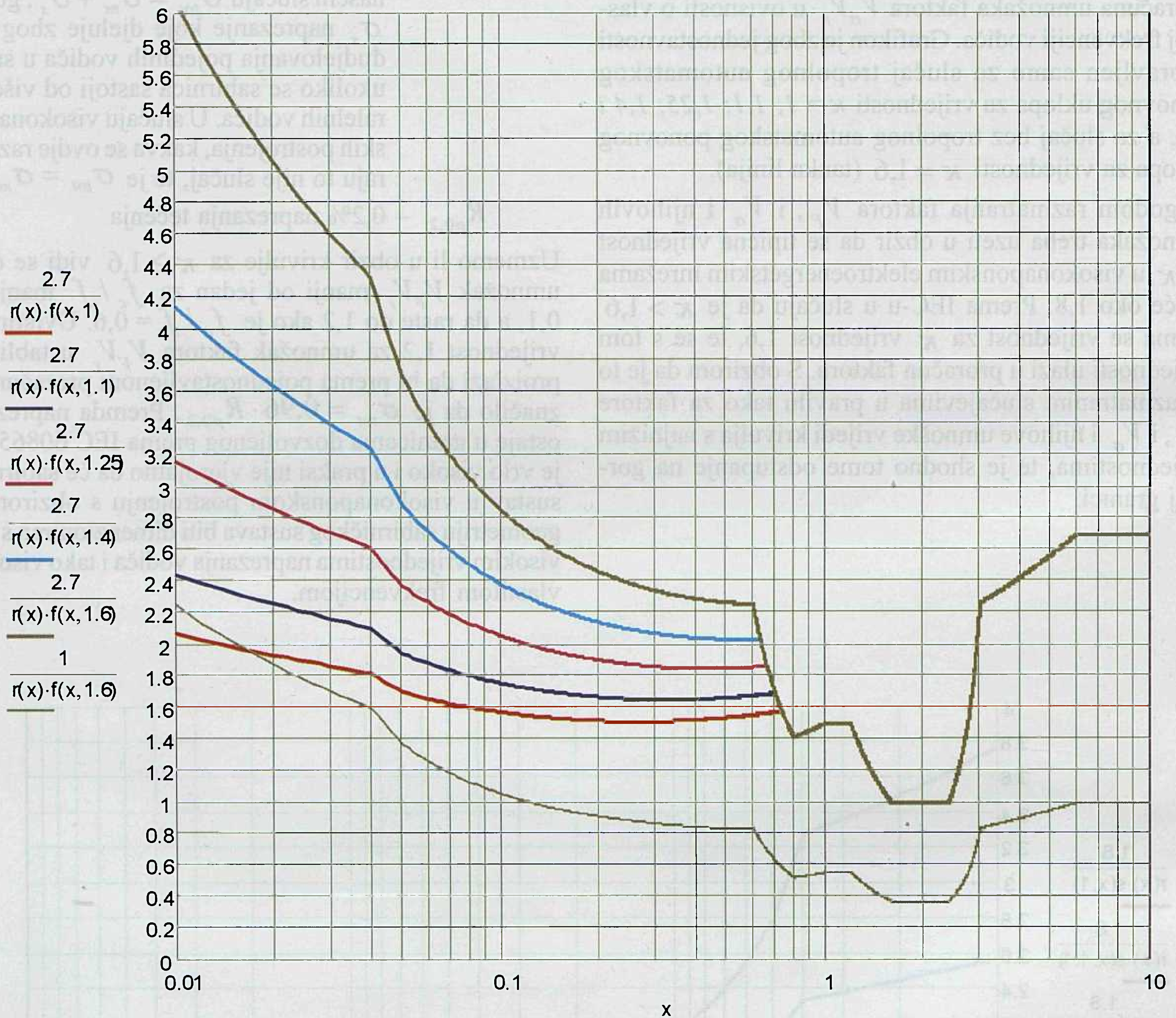
Slika 12. Grafikon prikazuje relativnu pogrešku prilikom izračunavanja umnožaka faktora $V_\sigma V_r$, u slučaju trolinog automatskog ponovnog uklopa

Na slici 13 prikazana je relativna pogreška prigodom izračunavanja umnoška faktora $V_F V_r$ u slučaju trolnog automatskog ponovnog uklopa. Debelim linijama prikazane su maksimalne vrijednosti, a za $\kappa \geq 1,6$ prikazane su i minimalne vrijednosti za slučaj da je

$$\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \geq 1$$

tankom linijom. Iz grafikona se vidi

da postoji veliki raspon odstupanja relativne pogreške, te da ona, kad je vlastita frekvencija sabirnice bliska frekvenciji elektroenergetskog sustava i kad je naprežanje sabirnice relativno veliko, može biti i manja od jedan, odnosno da sabirnica može biti poddimenzionirana. Premda je u praksi to kod visokonaponskih postrojenja malo vjerojatno, treba obratiti pozornost prigodom proračuna.



Slika 13. Grafikon prikazuje relativnu pogrešku prigodom izračunavanja umnoška faktora $V_F V_r$ u slučaju trolnog automatskog ponovnog uklopa

4. ZAKLJUČAK

Prigodom dimenzioniranja cijevnih sabirnica u skladu s IEC 60865 u visokonaponskim postrojenjima potrebno je u obzir uzeti vlastitu mehaničku frekvenciju sabirnice zbog toga što je vjerojatnost predimenzioniranja sabirničkog sustava i više od tri puta velika. Treba također uzeti u obzir da je stvarna vlastita frekvencija u pravilu niža od izračunate, a da je pogreška tim veća što je omjer vlastite frekvencije i frekvencije elektroenergetskog sustava manji, te što je ukupno naprežanje u sabirnici manje.

S obzirom da je postupak izračunavanje vlastite frekvencije vrlo jednostavan, kao i izračun faktora V_F , V_r i V_σ preporučljivo je izračunati naprežanje vodiča i sile na izolatore u oba slučaja te analizirati u kojem intervalu je očekivana vlastita frekvencija sabirnice, te prema tome izvršiti njeno dimenzioniranje. Što se tiče kratkog spoja i naprežanja koja se javljaju kao posljedica kratkog spoja povoljno je da vlastita frekvencija vodiča bude što je moguće manja. Omjeri f_c / f manji od 0,1 su vrlo povoljni jer znatno reduciraju naprežanja vodiča i sile na izolatore, a naročito kad je i vrijeme trajanja kratkog spoja manje od 0,1 s te se naprežanja zbog toga dodatno smanjuju.

LITERATURA

- [1] Prof. dr. Z. JANKOVIĆ: "Teorijska mehanika", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1966
- [2] Prof. dr. D. BAZJANAC: "Tehnička mehanika", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1974
- [3] Prof. dr. I. ALFIREVIĆ: "Nauka o čvrstoći", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1978
- [4] IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 1, 1993-09
- [5] IEC 60865-2 Short-circuit currents – Calculation of effects Part 2, 1994-06
- [6] K. Begović, dipl. ing. el.: "Rasklopna postrojenja 400 kV u cijevnoj izvedbi"; Energija 1972, br. 3-4

THE ROLE OF BUSBAR SELF-FREQUENCY WHEN CALCULATING LINE STRAIN AND FORCE TO INSULATORS IN HIGH-VOLTAGE STATIONS ACCORDING TO IEC 60865

In the paper a calculation on fixed lines (tube-shaped busbars) strain and forces on support insulators in high-voltage stations is given according to IEC (IEC60865-1 Short-circuit currents - Calculation of effects Part 1, 1993-3 and IEC 60865-2 Short circuit currents - Calculation of effects Part 2, 1994-2).

Special attention is paid to the role of lines' self-frequency on calculated values and comparative values with real examples as well as theoretically whether lines' self-frequency is taken into account. It is shown that if self-frequency is not taken into account, in the case of high-voltage stations with tube-shaped busbar calculated values are a few times bigger than the calculated ones concerning busbar self-frequency.

DER EINFLUSS VON SAMMELSCHIENEN-EIGENFREQUENZ AUF DIE BERECHNUNG DER FESTIGKEITSSPANNUNGEN IN LEITERN UND DER AUF ISOLATOREN WIRKENDEN KRÄFTE BEI DEN HOCHSPANNUNGSANLAGEN, LAUT IEC 60865

Dargestellt ist die Berechnung von mechanischen spannungen in starren Leitern (Rohrsammelschienen) und der auf Stützensolatoren wirkenden Kräfte in Hochspannungsanlagen, laut IEC (IEC 60865-1 Short-circuit currents - Calculation of effects Part 1, 1993-3 [Kurzschlussströme -Berechnung der Wirkungen 1. Teil] und IEC 60865-2 Short-circuit currents - Calculation of effects Part 2, 1994-2 [Kurzschlussströme - Berechnung der Wirkungen 2. Teil]).

Besondere Aufmerksamkeit ist dem Einfluss der Eigenfrequenz der Leiter auf berechnete Größen gegeben; dabei sind Vergleichsgrößen mit realen Beispielen: - theoretisch, bei der Vernachlässigung der Leiter-Eigenfrequenz und danach diese beachtend, angeführt.

Es hat sich gezeigt, dass für Hochspannungsanlagen mit Rohrsammelschienen die berechneten Größen ohne Rücksicht auf die Eigenfrequenz vielfach grösser sind, als jene bei der Berücksichtigung dieser Frequenz.

Naslov pisca:

**Mr. sc. Borko Frühwirth, dipl. ing.
Končar-Inženjering za energetiku
i transport d.d.
Fallerovo šetalište 22,
10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2002 – 06 – 26.