

תופעת תהודה בחלית במערכת ההולכה

כנס התאגדות מהנדסי החשמל

14.11.24 | הנרי ברייר



תוכן עניינים

- Introduction, רקע, רעיון
- FERRORESONANCE – סקר תיאורטי
- STUDY CASE - תחמ"ג 400KV
- ממצאים
- סיכום והמלצות



מסדרון ההולכה 400KV

- רשת ההולכה 400KV - "עמוד השדרה" של ה-TRANSMISSION
- חיבור יחידות יצור – אנרגיות מתחדשות, לקוחות פרטיים
- קיים צורך בהעברת האנרגיה לאזורי הצריכה
- הרחבת צירי תעבורת אנרגית החשמל – שדרוג ציוד בתחמ"ג, קווי הולכה חדשים, תוספות תכנון.

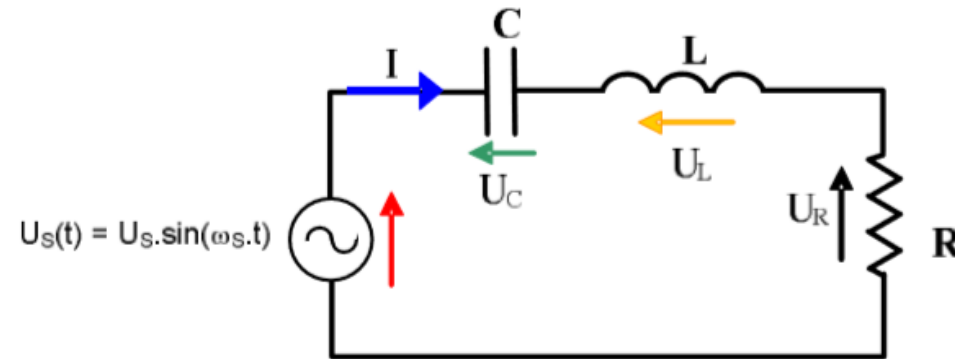
מעגל תהודה בסיסי

לינארי:

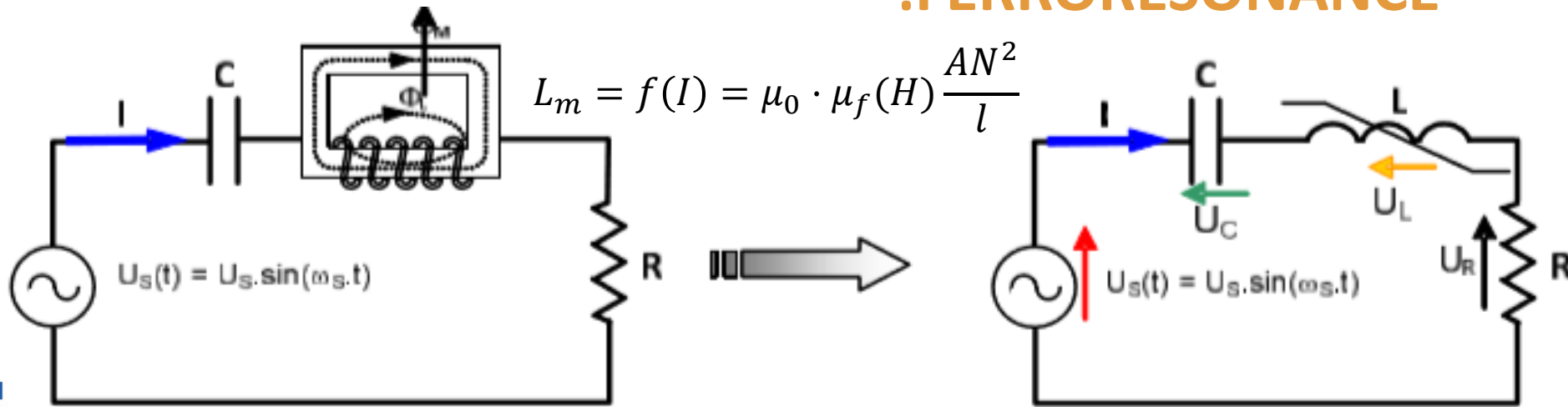
$$U_s = R * I + j * I \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C} \right) = R * I + j * I (X_L - X_C) = R * I$$

$$X_L = X_C$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



:FERRORESONANCE



FERRORESONANCE

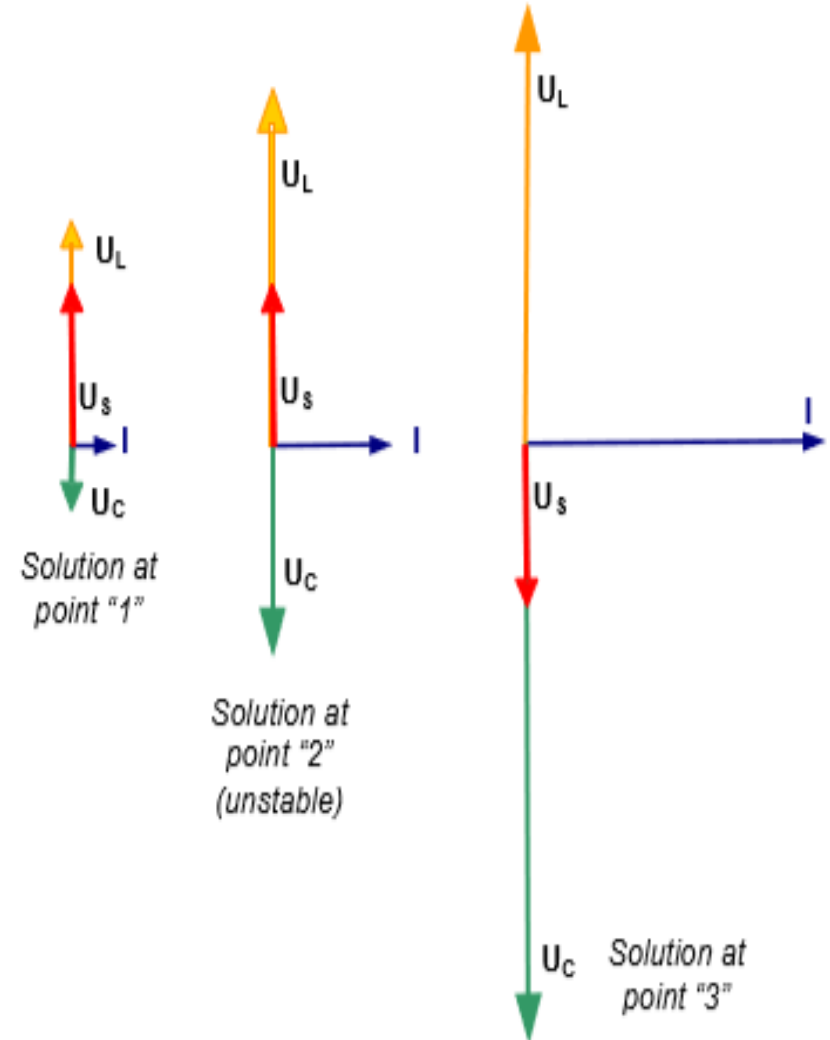
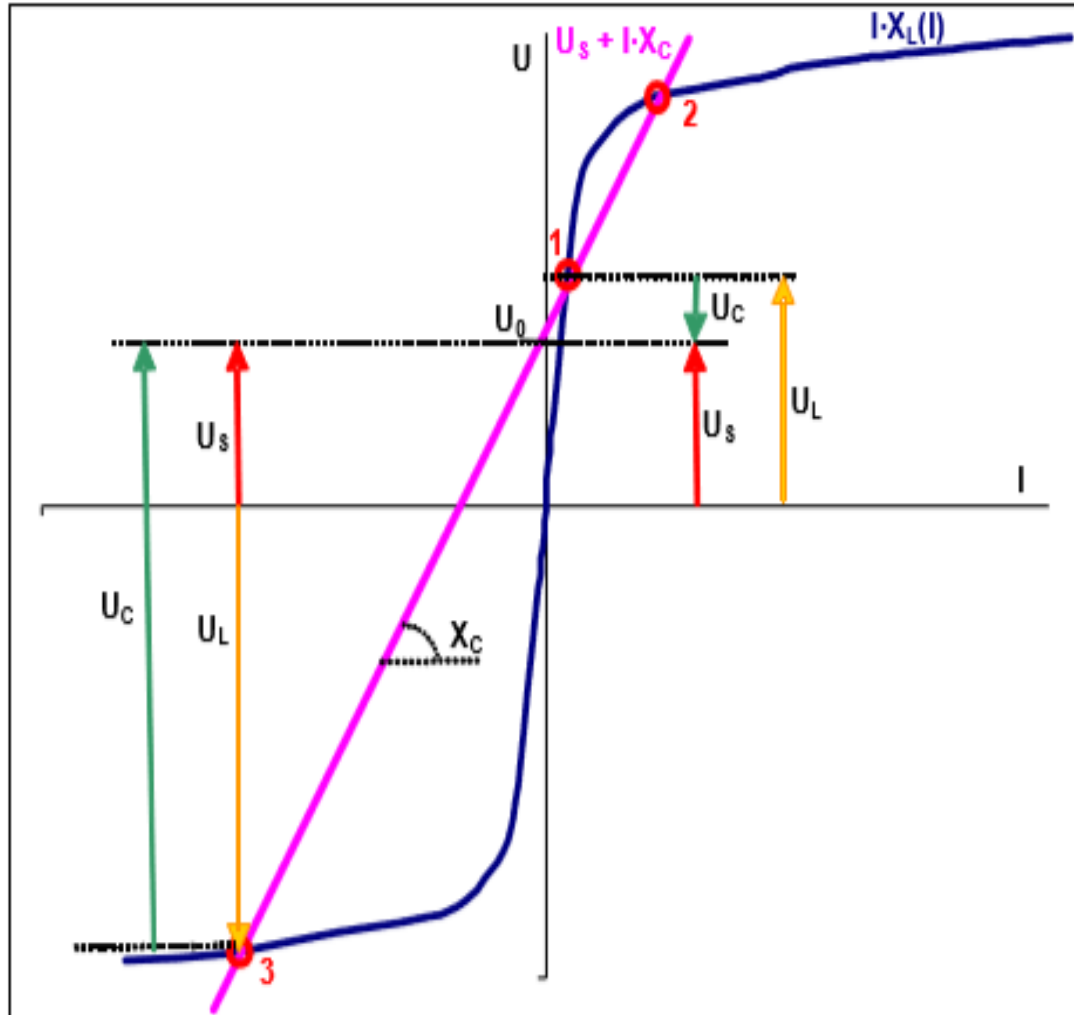
התקיימות של תנודות תהודה ברזלית המתרחשות במערכת
פיסיקלית הכוללת אלמנט השראותי עם ליבה מגנטית לא
ליניארית, אלמנט קיבול ומקור מתח חילופין

התופעה:

1. קשה לחיזוי, מורכבת, מוזרה ועמומה
2. מופיעה ממתחי יתר ארעיים
מיתוג מפסקים אסימטרי, קצרים חפ"א, מיתוג שנאי הספק עם עומס קל.
3. מתקיימת אינטראקציה של חילופי אנרגיה בין אלמנט הקיבול לאלמנט השראות
המגנטי הלא ליניארי
4. בעלת טבע וסוג יציבות אלימה של תנודות דינמיות

FERRORESONANCE

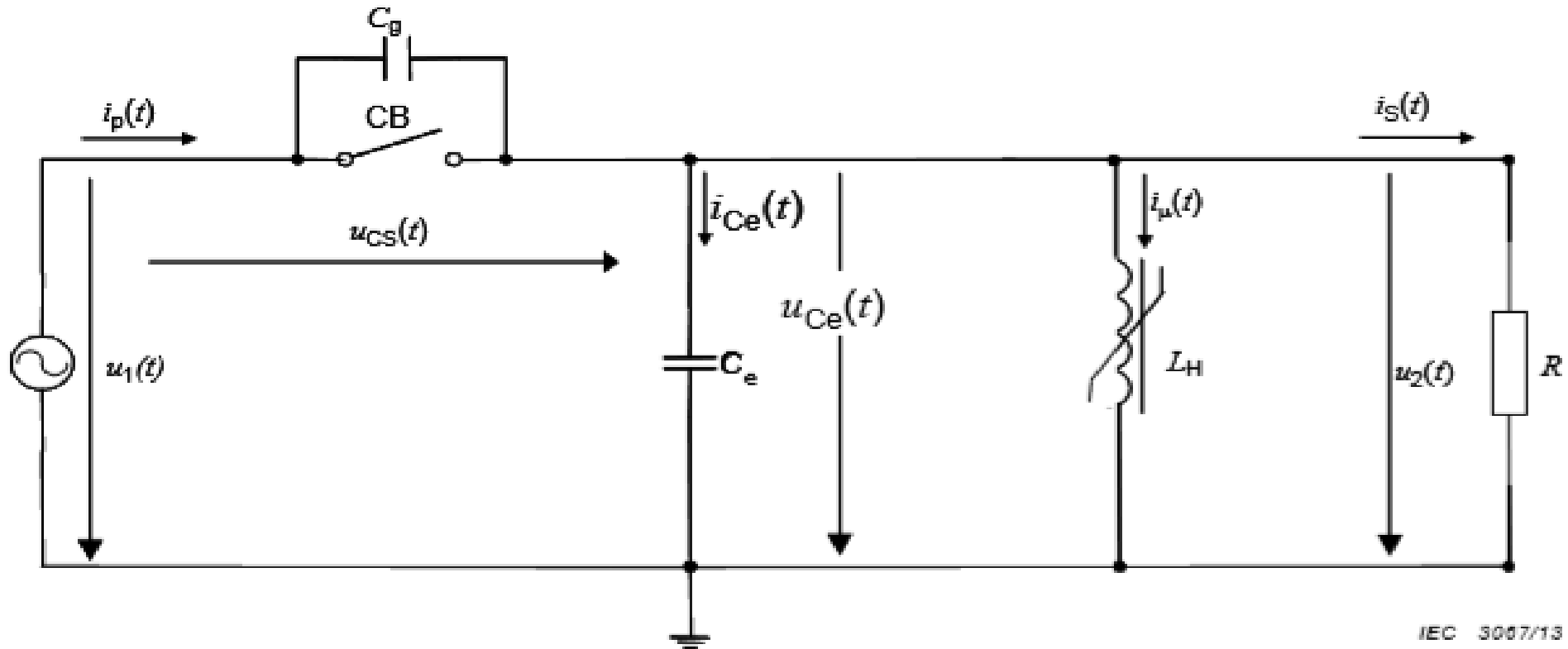
ניתוח גרפי



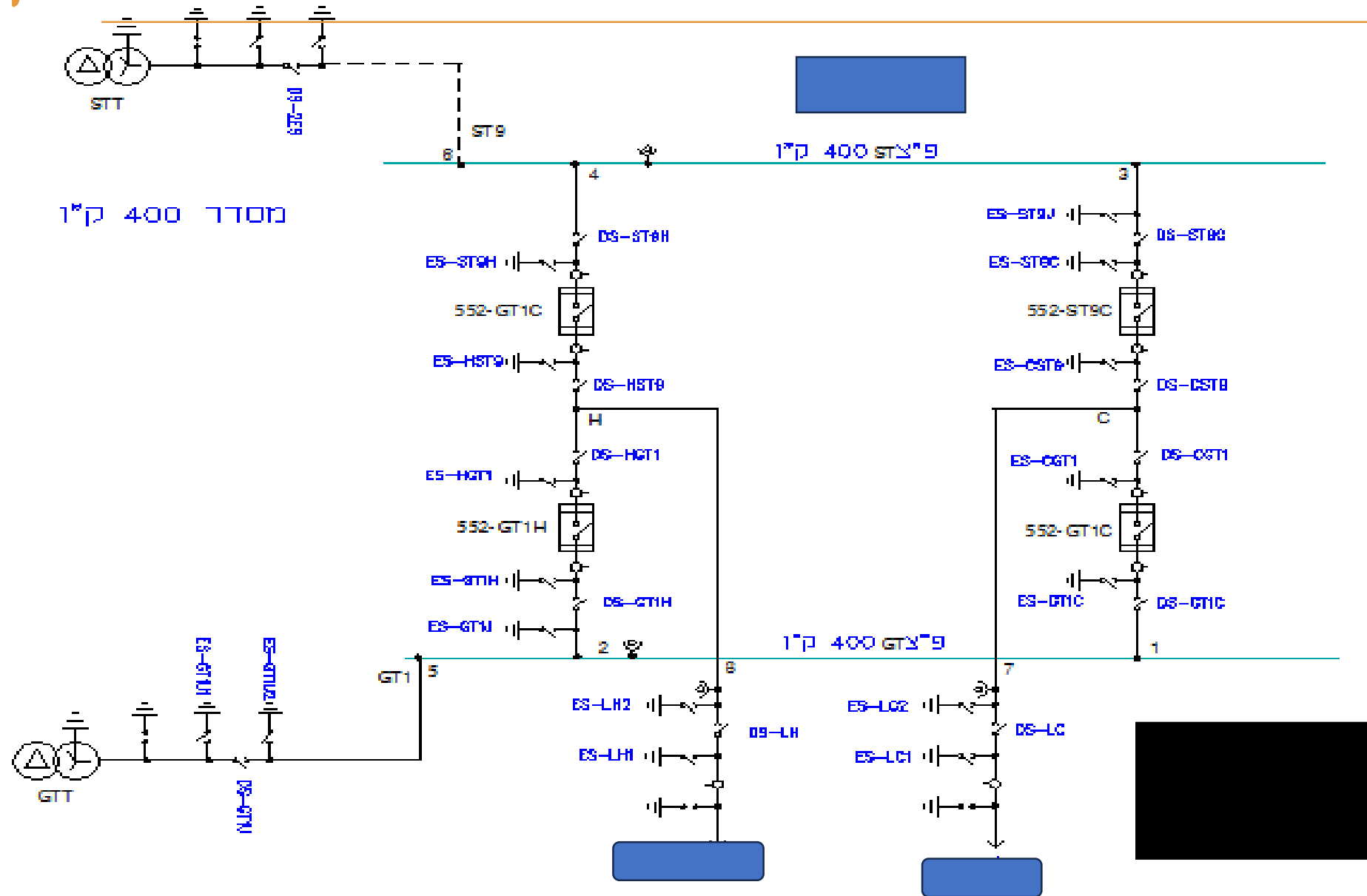
FERRORESONANCE

תיאור המשוואה הדיפרנציאלית הלא ליניארית

$$\frac{d^2\psi(t)}{dt^2} + \frac{1}{R(C_e+C_g)} \frac{d\psi(t)}{dt} + \frac{A_1}{(C_e+C_g)} \psi(t) + \frac{A_3}{(C_e+C_g)} \psi^3(t) + \frac{A_5}{(C_e+C_g)} \psi^5(t) = \frac{C_g}{(C_e+C_g)} U_m \sin(\omega t + \varphi_s) \quad \blacktriangleright$$

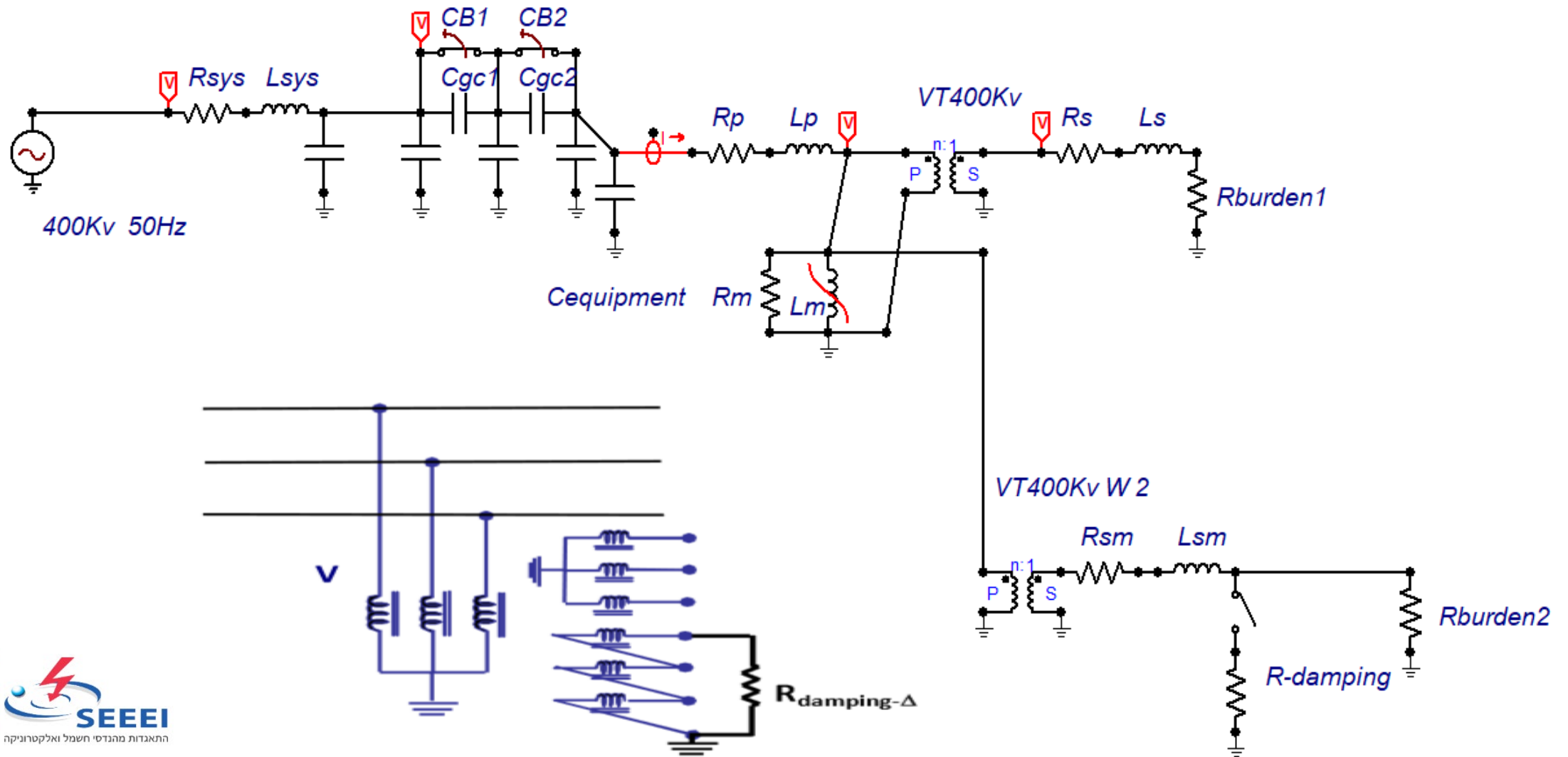


STUDY CASE תחנת מיתוג 400 ק"ו





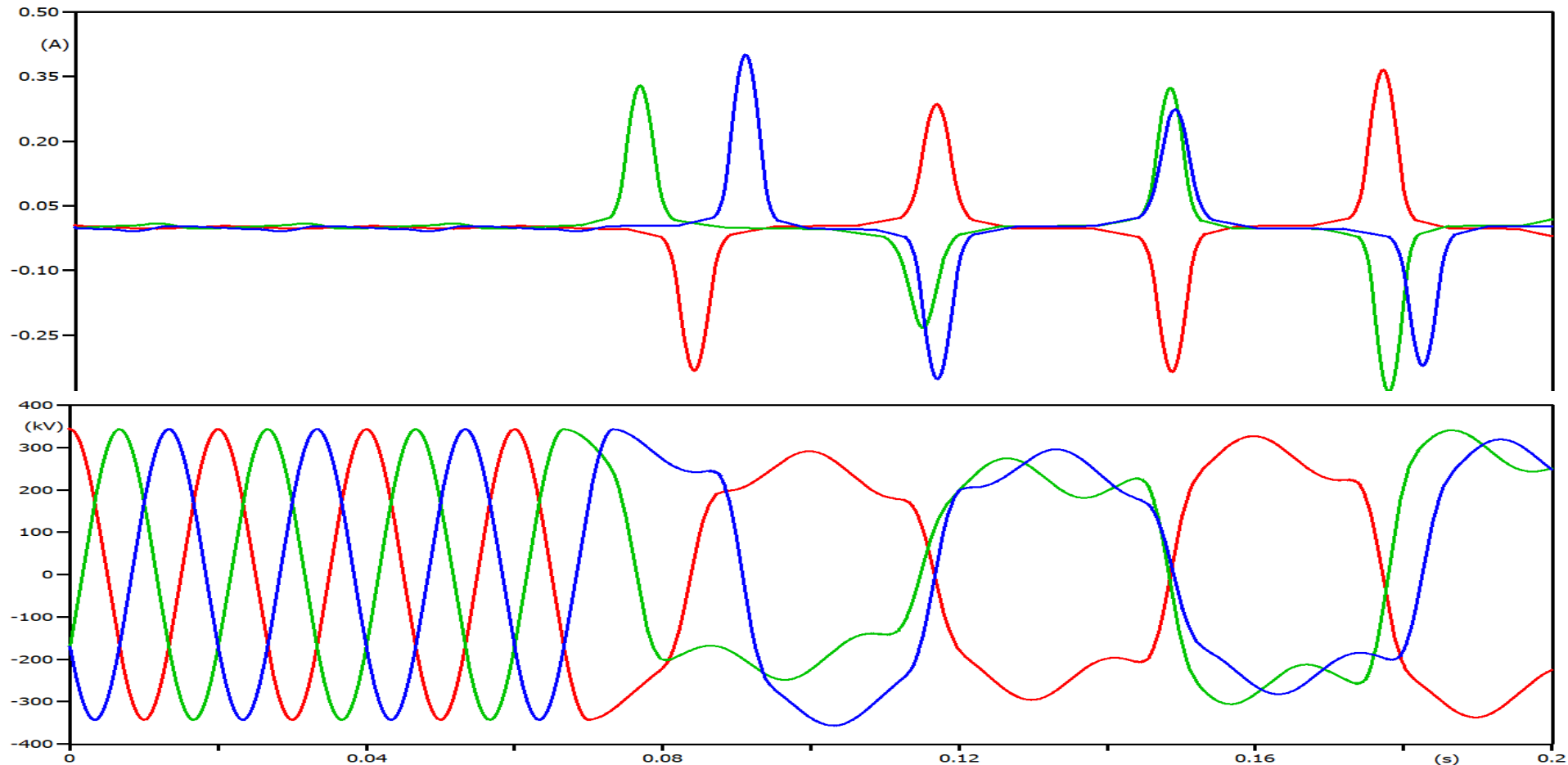
מודל הבדיקה לתחנת מיתוג 400 ק"ו



מפסק יחיד ב- 0°

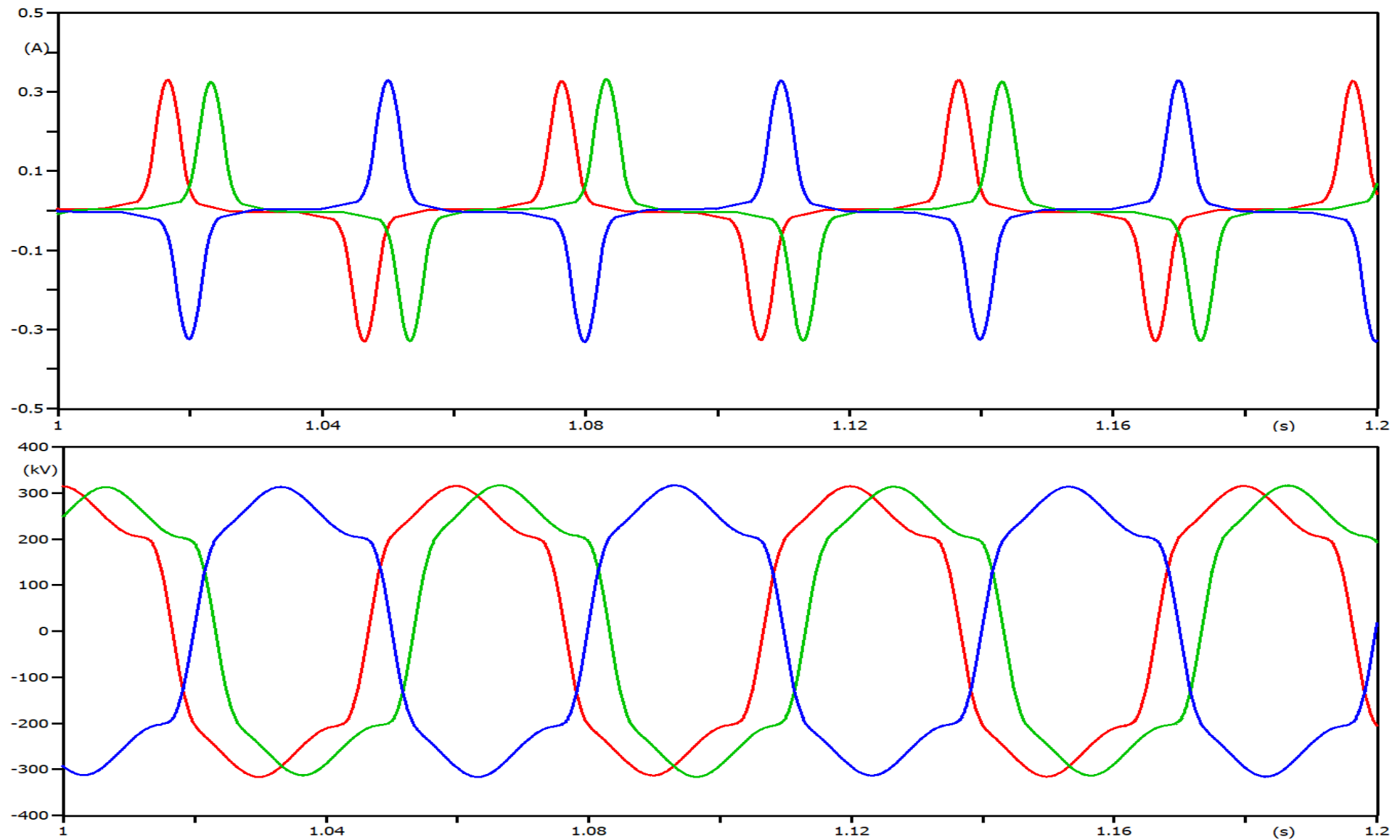
מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(M Ω)	φ ($^\circ$)	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
------------------------	------------------	---------	-----------------	------------------------	----------------------	--------------------	-----------

1-200 2300 1600 106.6 0 65 ללא 0



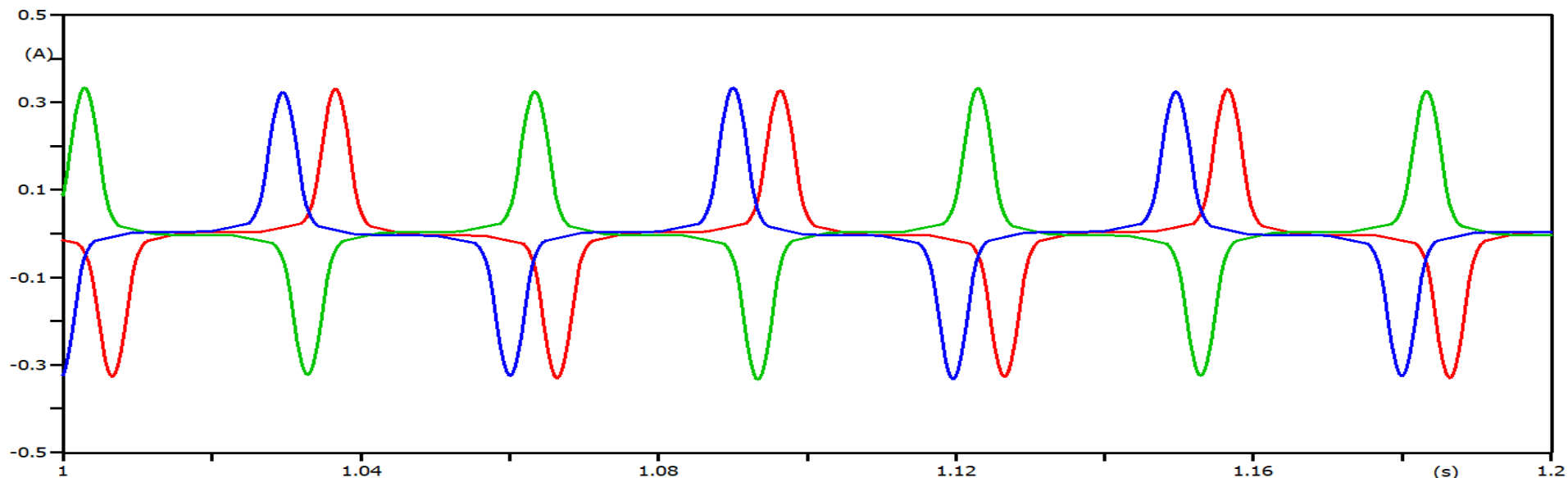
(file Henry3PHZGLF3cbopen1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

מפסק יחיד ב- 36°



(file Henry3PHZGLF3cbopen1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

מפסק יחיד ב- 324°

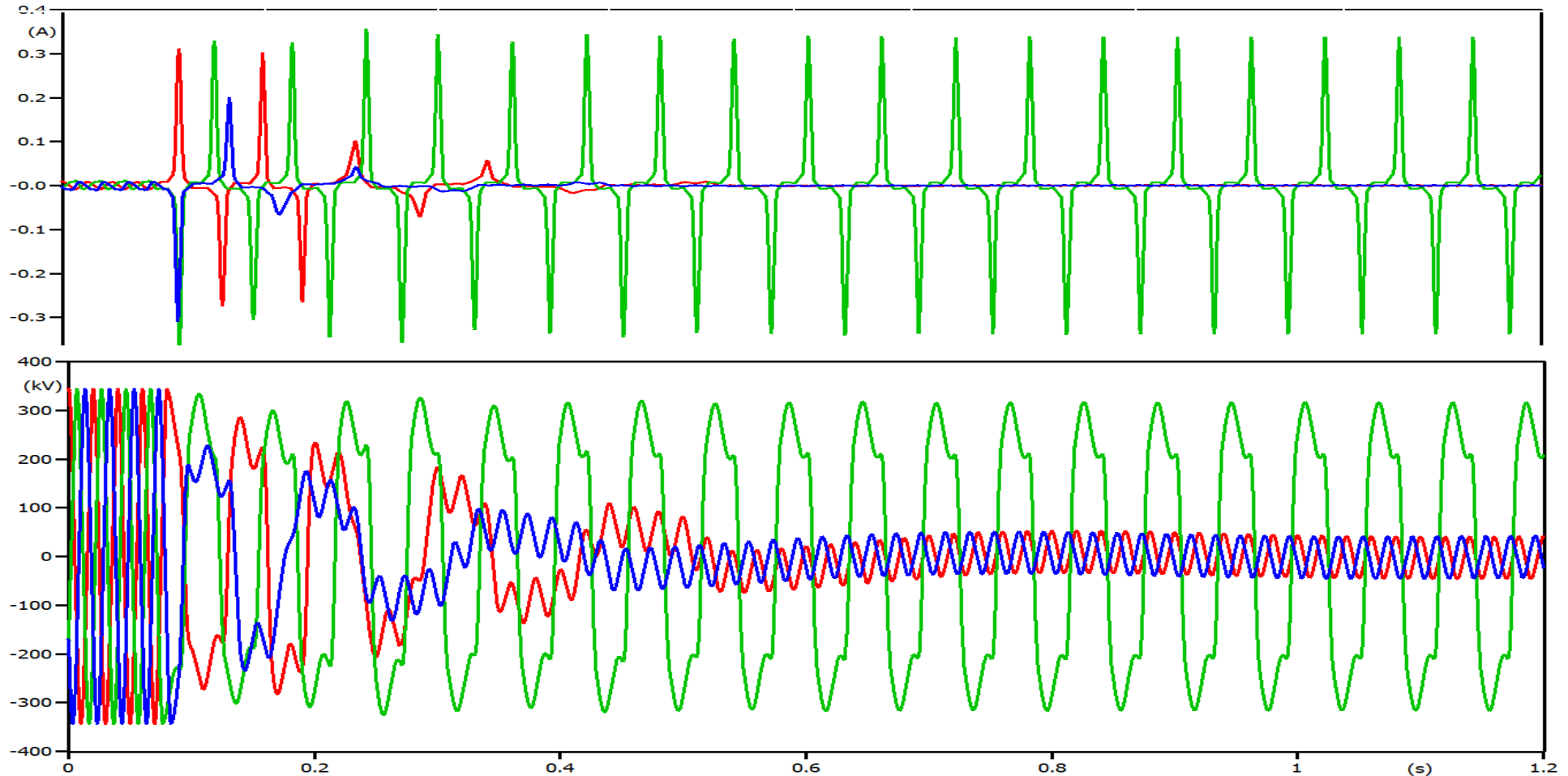


זווית המיתוג	מופע I	הפרש בין המופע II-I	מופע II	הפרש בין המופע III-II	מופע III
65	B	40	C	160	A
67	A	40	B	160	C
83	C	40	A	160	B

מפסק יחיד ב- 180° הפסד $53.3M\Omega$

מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(M Ω)	φ ($^\circ$)	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
------------------------	------------------	---------	-----------------	------------------------	----------------------	--------------------	-----------

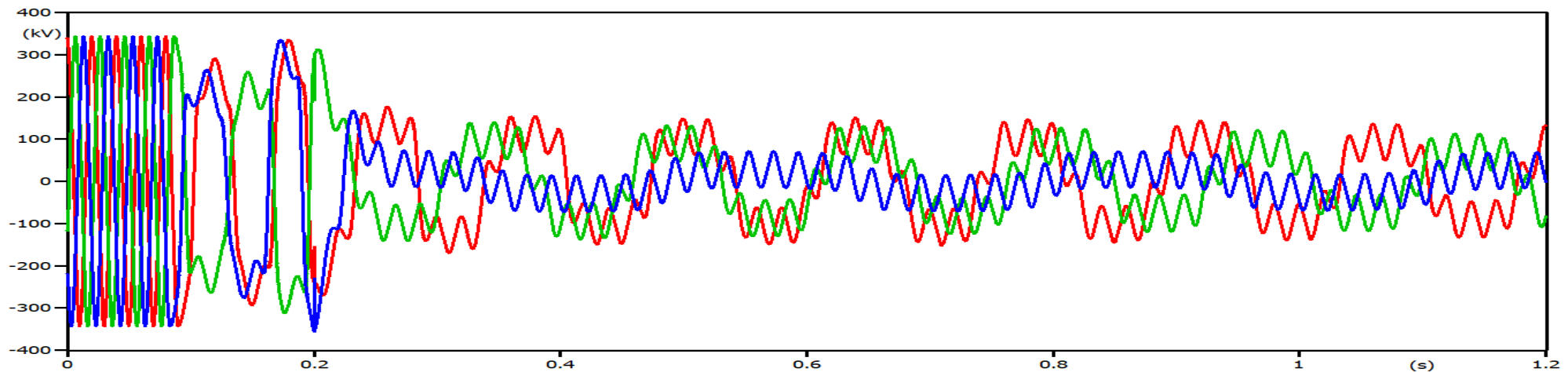
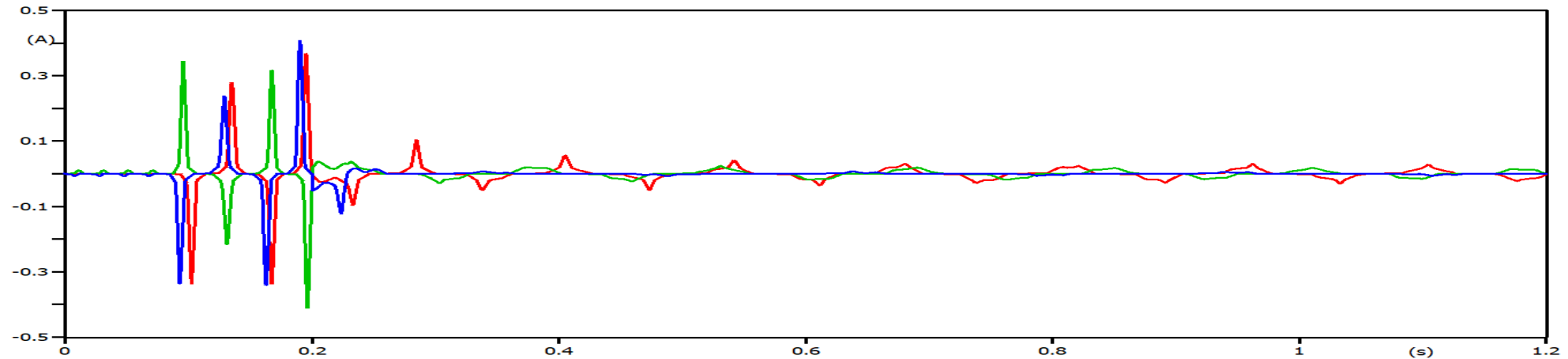
1-200 2300 1600 53.3 180 75 ללא 50



(file Henry3PHZGLF3cbopen1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

מפסק יחיד ב- 180° הפסד $1066M\Omega$

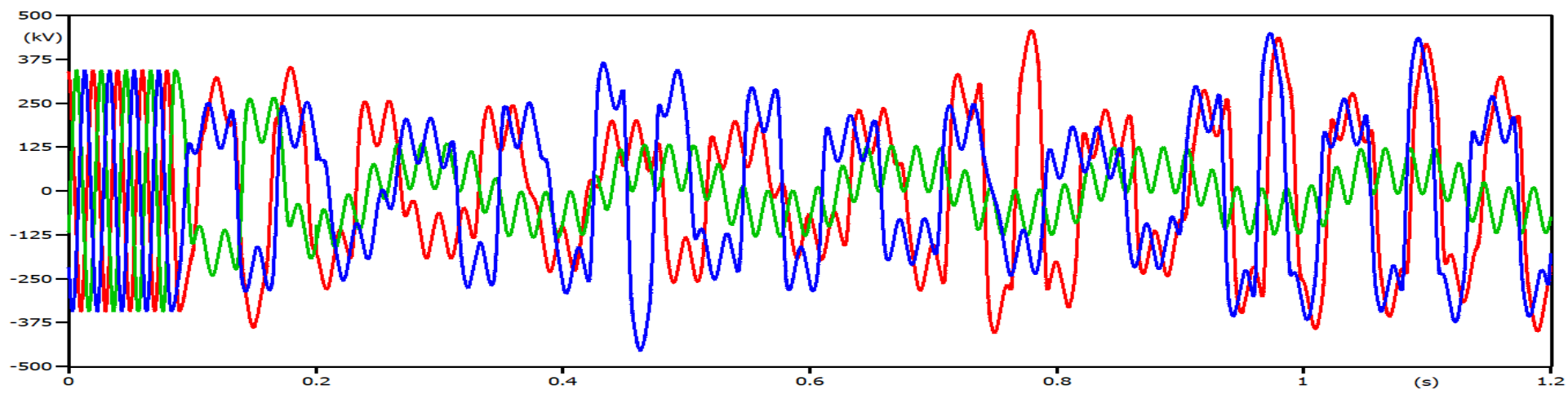
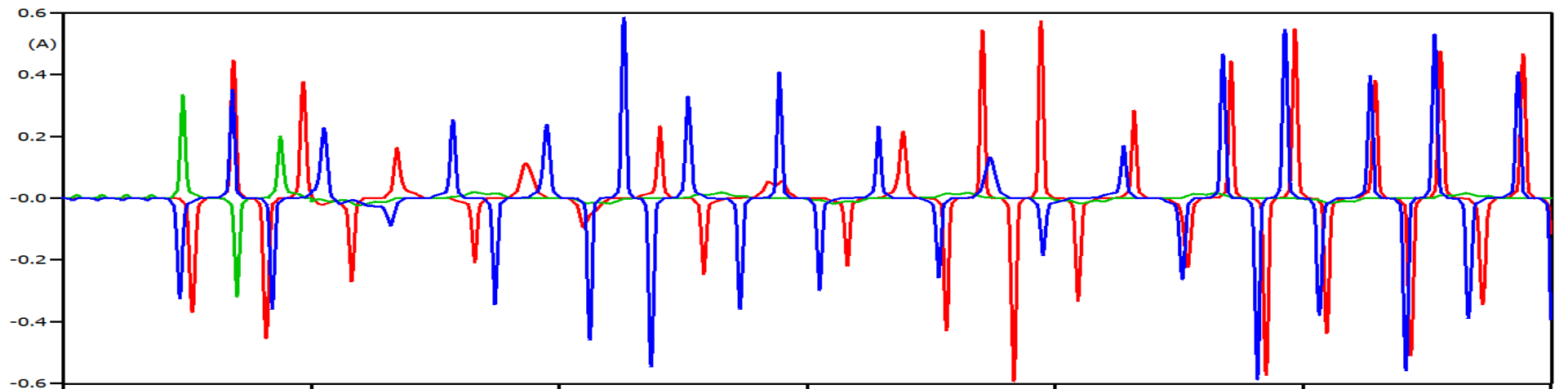
מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(M Ω)	φ ($^\circ$)	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
1-200	2300	1600	1066.6	180	75	A=0.8 ; B=0.6; c=0.5	0



(file HenryEINTOOTHF1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

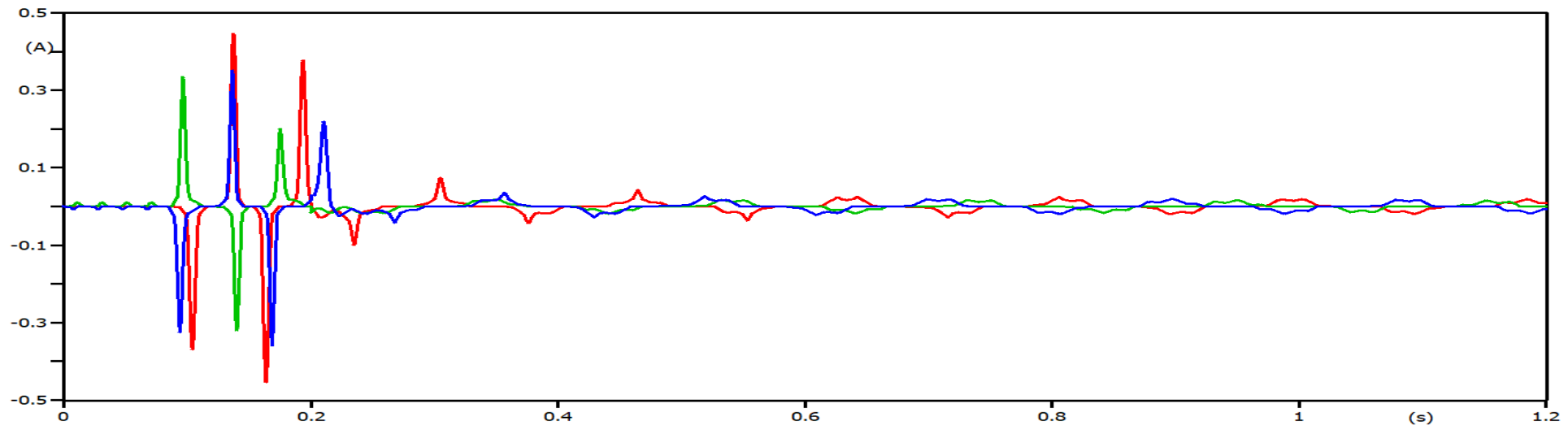
שני מפ'ז ב- 0° הפסד $1066M\Omega$

מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(M Ω)	φ ($^\circ$)	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
2-400	2780	3200	1066.6	0	65	1	0

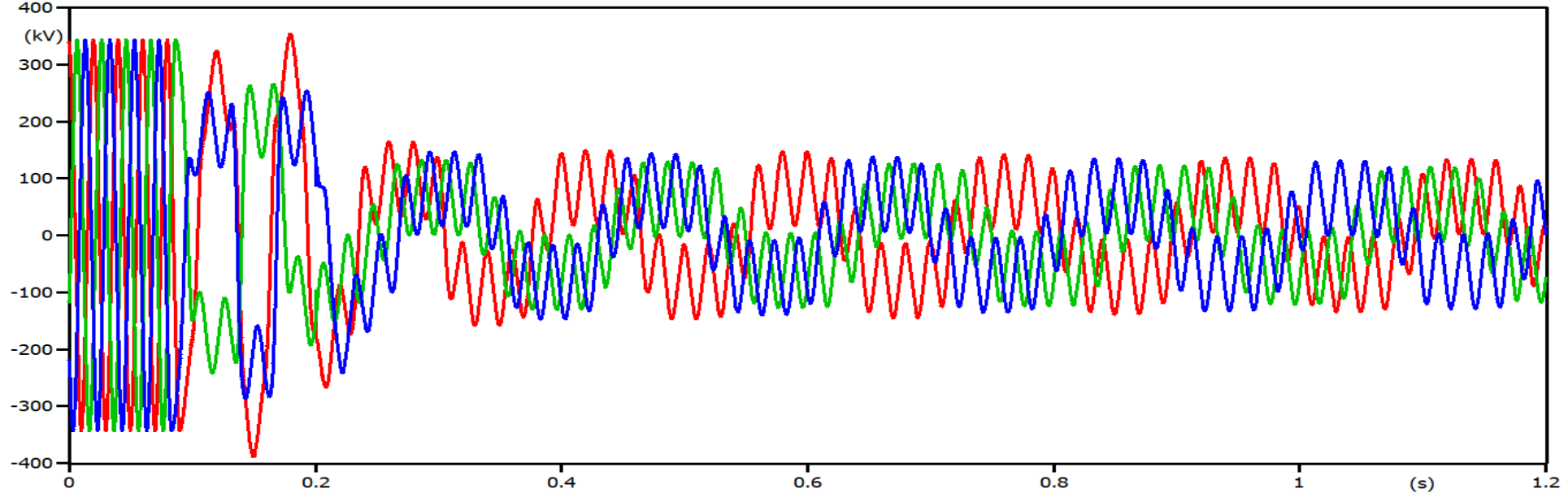


(file HenryEINTOOTHF1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

שני מפסקים ב- 0° הפסד $1066M\Omega$ ריסון 0.7Ω



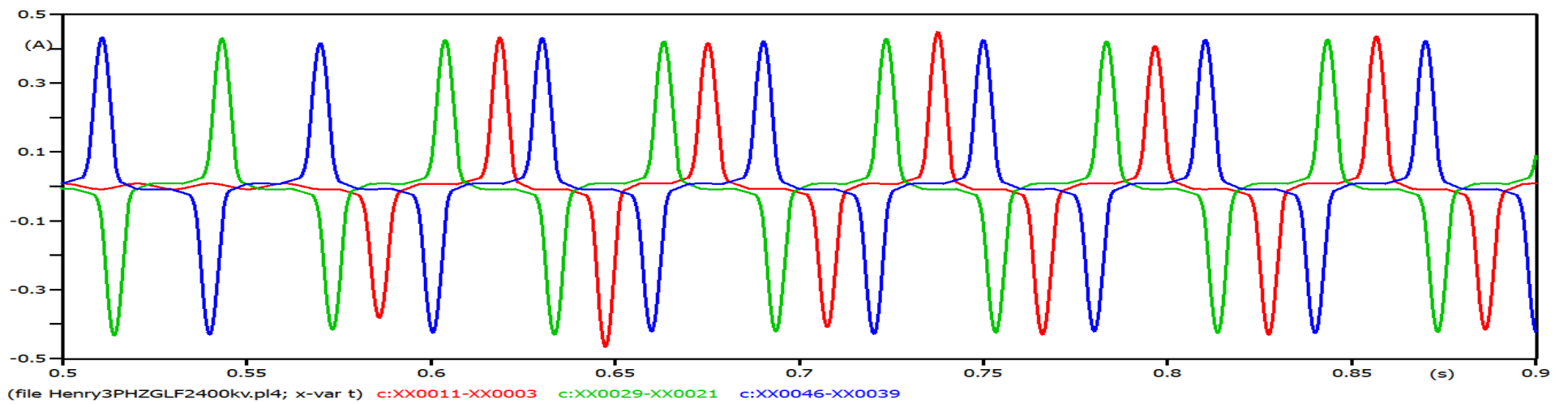
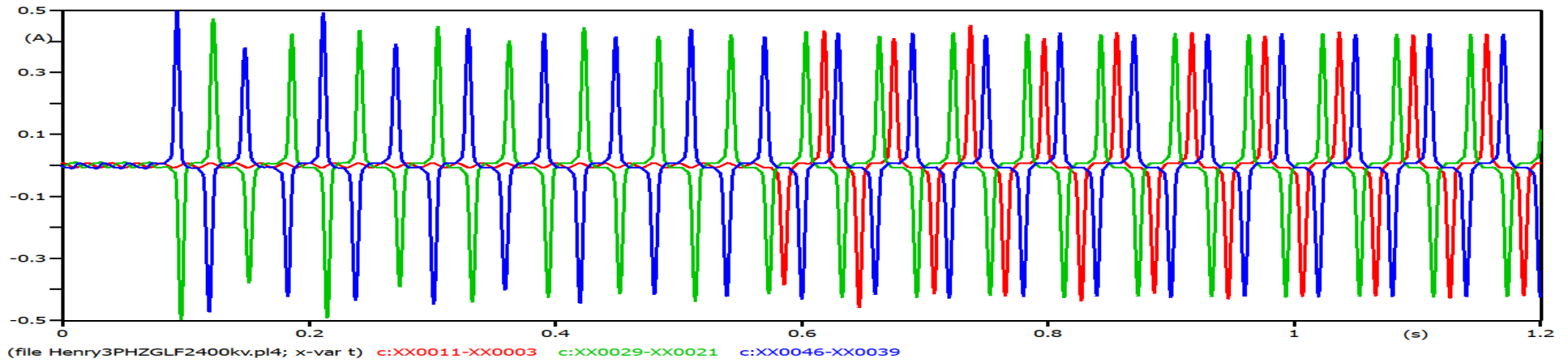
(file HenryEINTOOTHF1400kv.pl4; x-var t) c:XX0011-XX0003 c:XX0029-XX0021 c:XX0046-XX0039



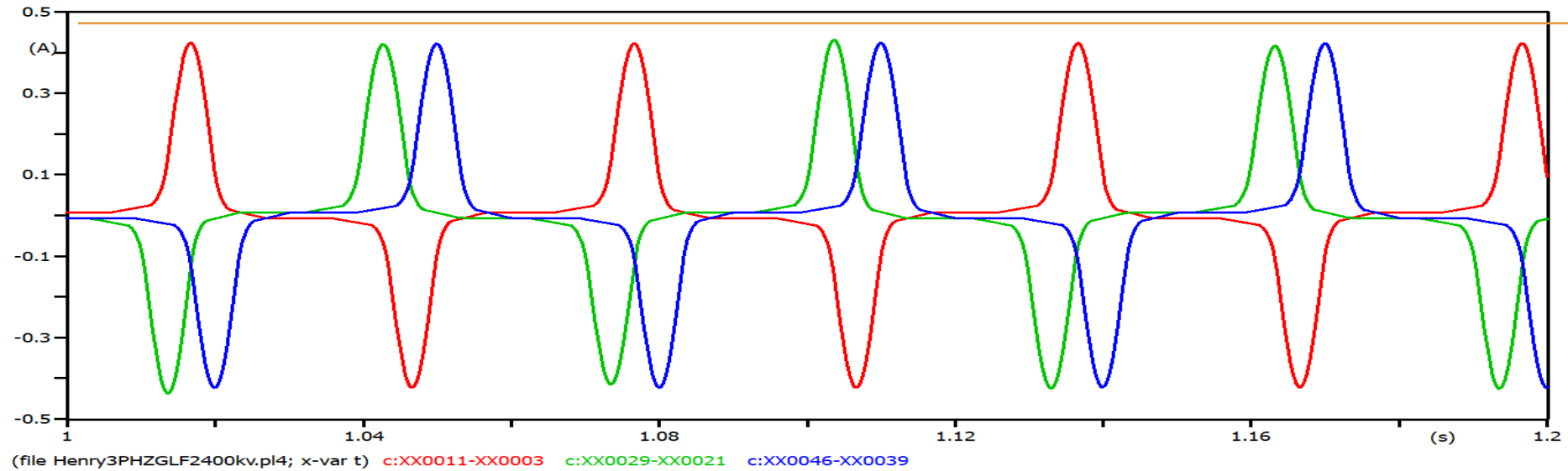
(file HenryEINTOOTHF1400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0026 v:XX0043

אי אחידות מופעים A

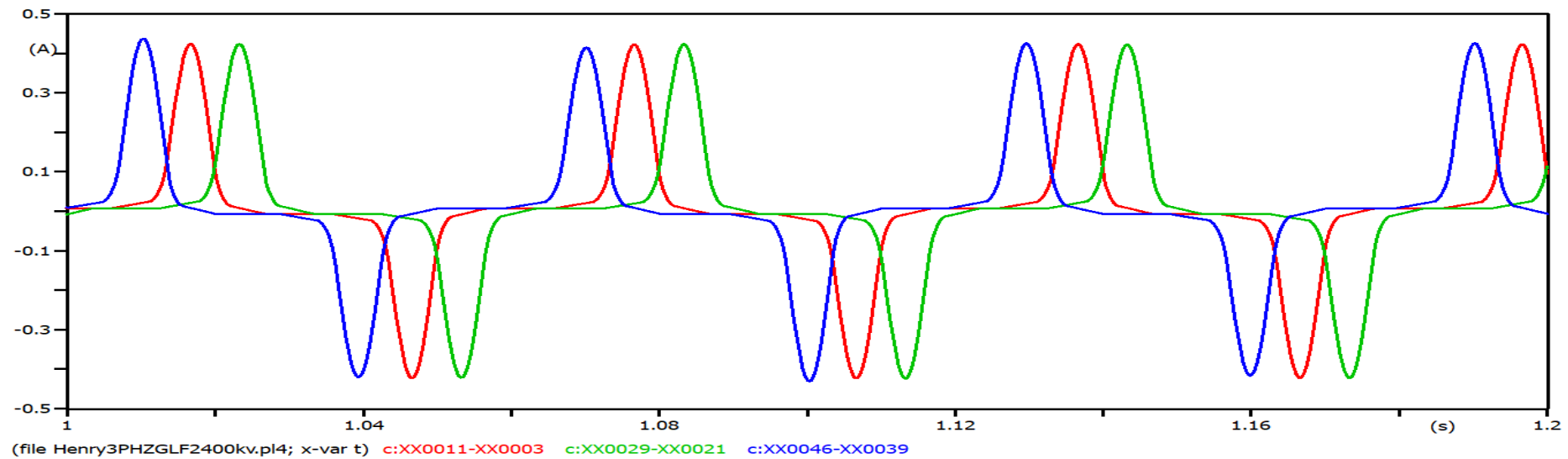
מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(MΩ)	$\varphi(^{\circ})$	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
2-400	2780	3200	53.3	90	A=570 ; B=70; c=70	ללא	50



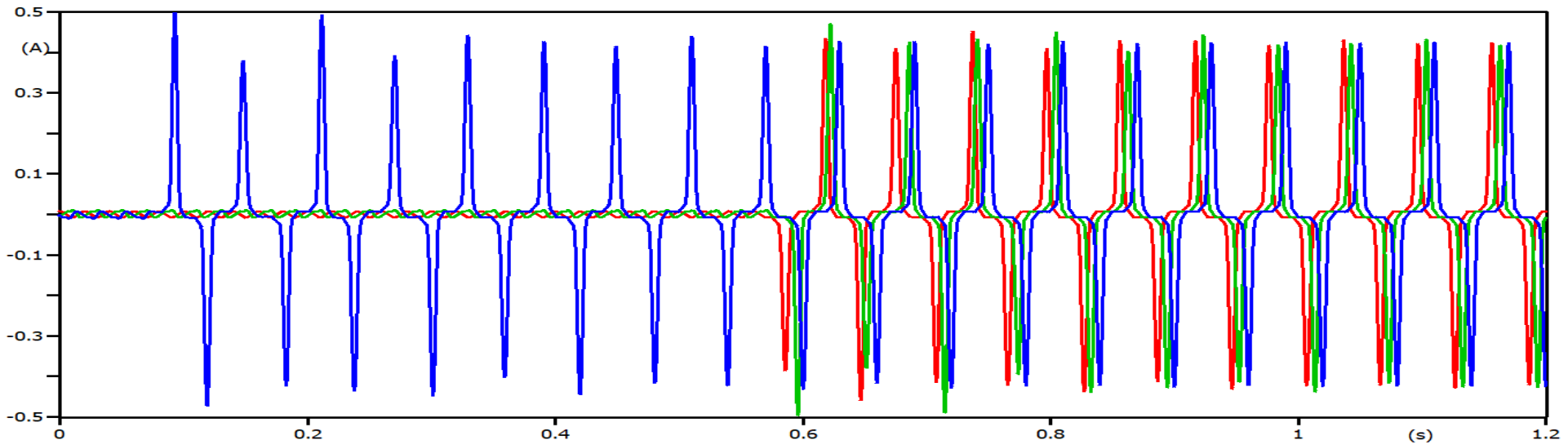
אי אחידות מופעים B



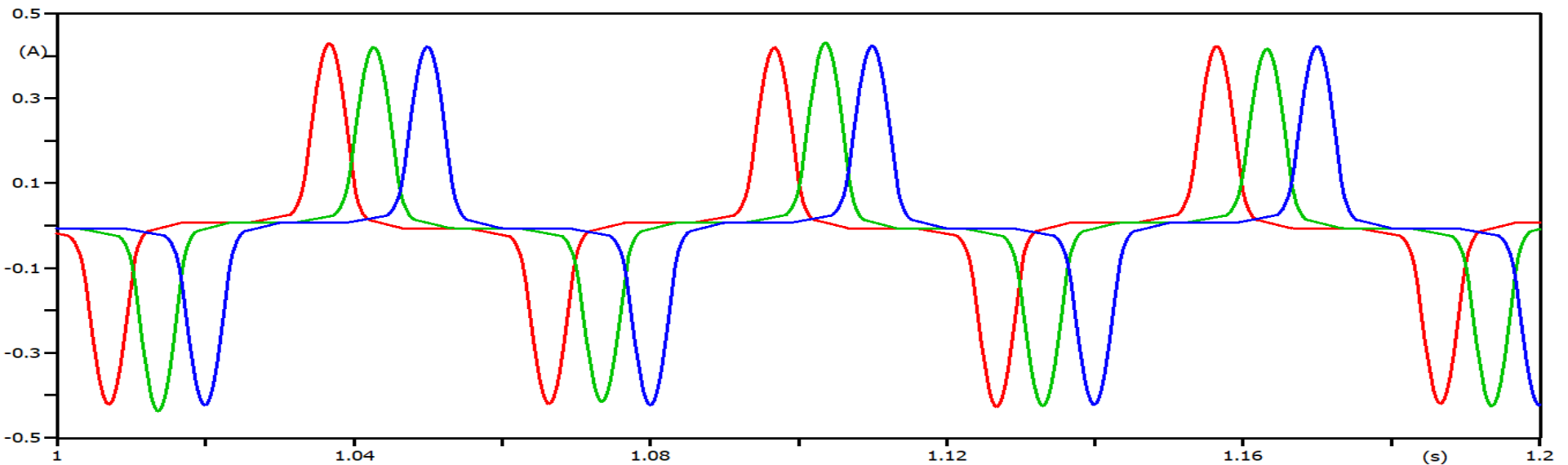
אי אחידות מופעים C



אי אחידות מופעים A+B

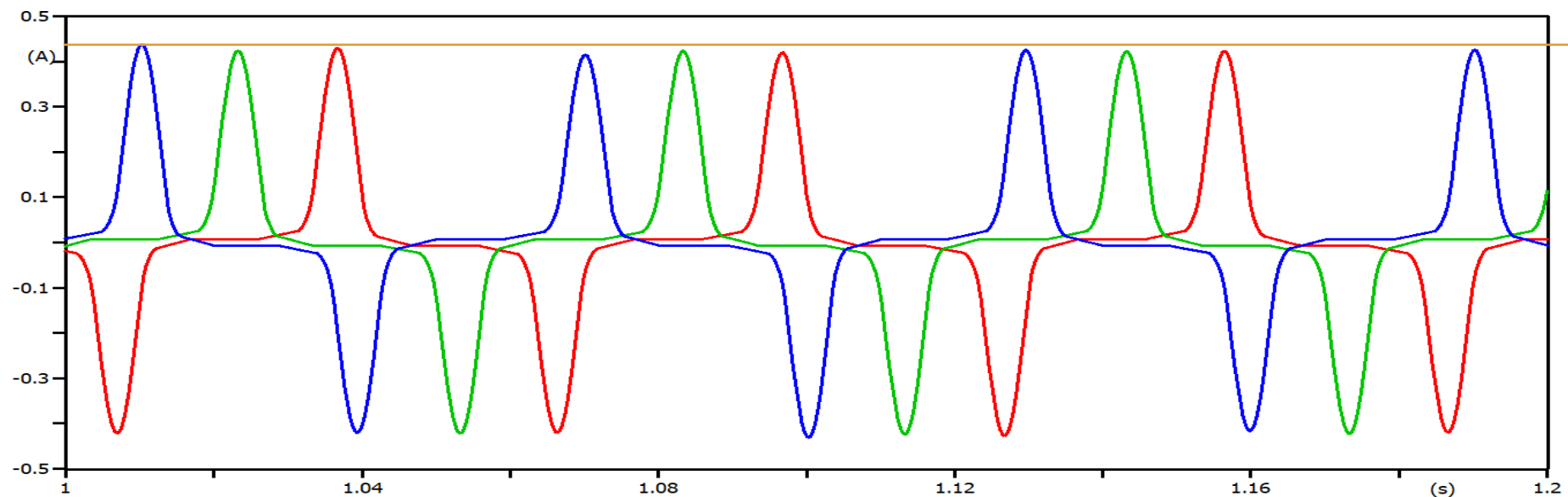


(file Henry3PHZGLF2400kv.pl4; x-var t) c:XX0011-XX0003 c:XX0029-XX0021 c:XX0046-XX0039



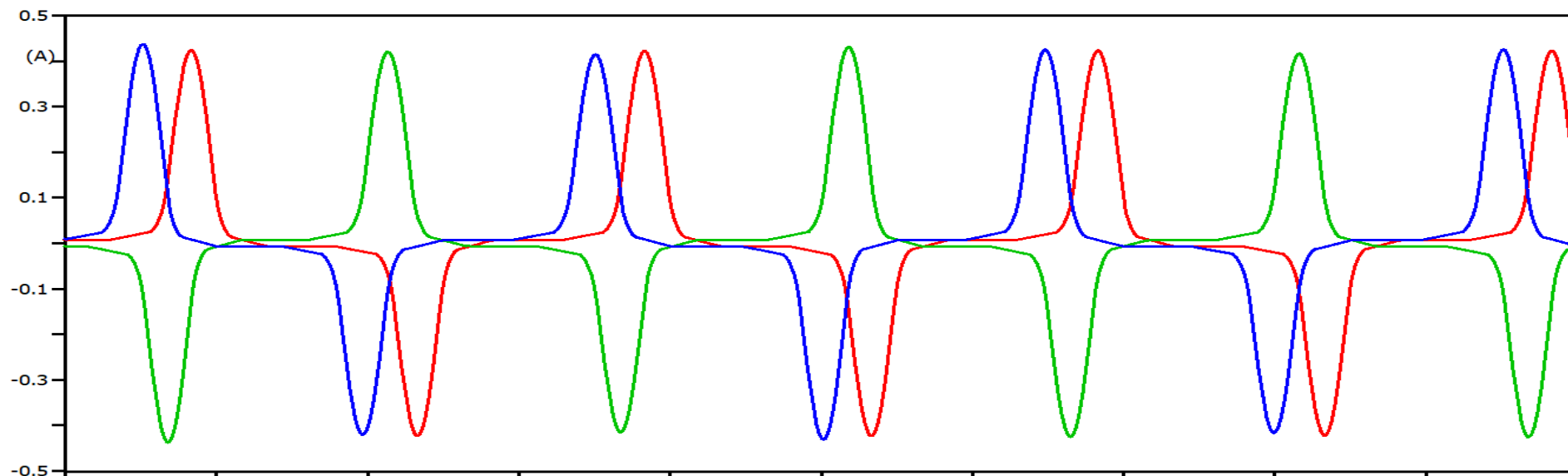
(file Henry3PHZGLF2400kv.pl4; x-var t) c:XX0011-XX0003 c:XX0029-XX0021 c:XX0046-XX0039

אי אחידות מופעים A+C



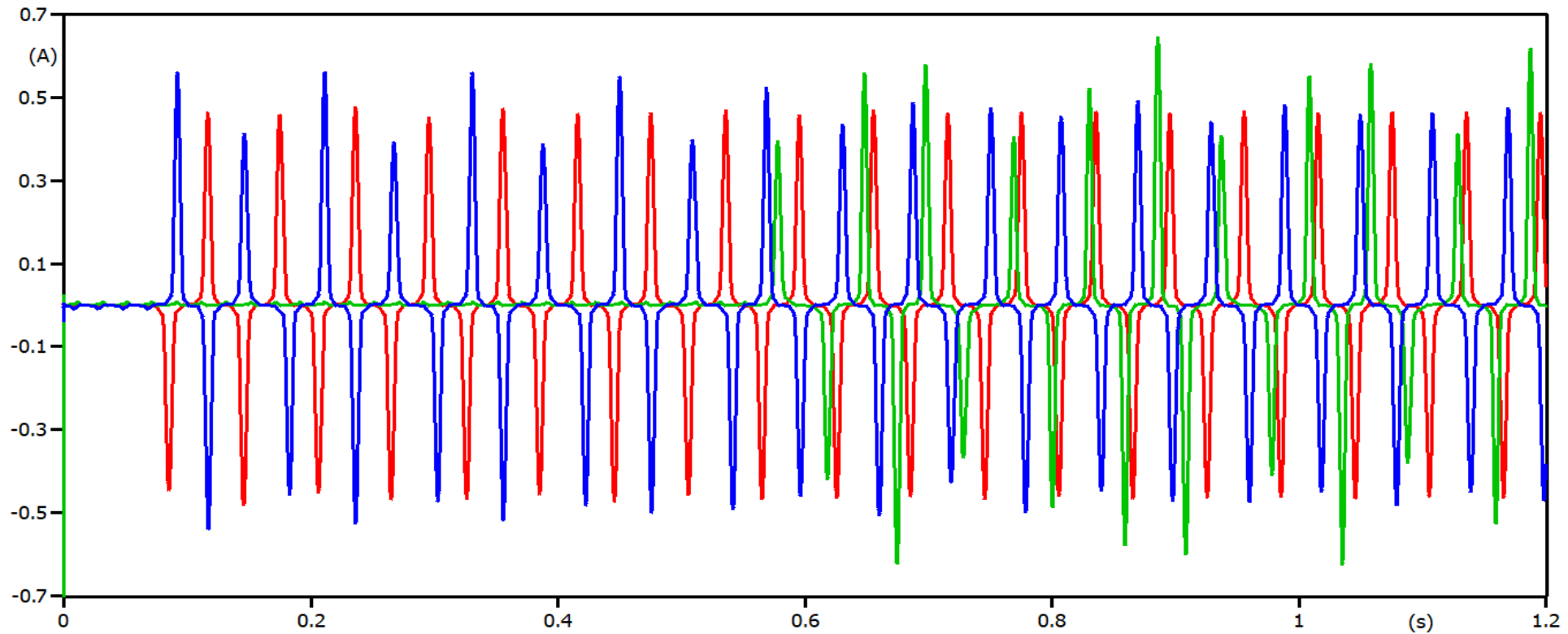
(file Henry3PHZGLF2400kv.pl4; x-var t) c:XX0011-XX0003 c:XX0029-XX0021 c:XX0046-XX0039

אי אחידות מופעים B+C



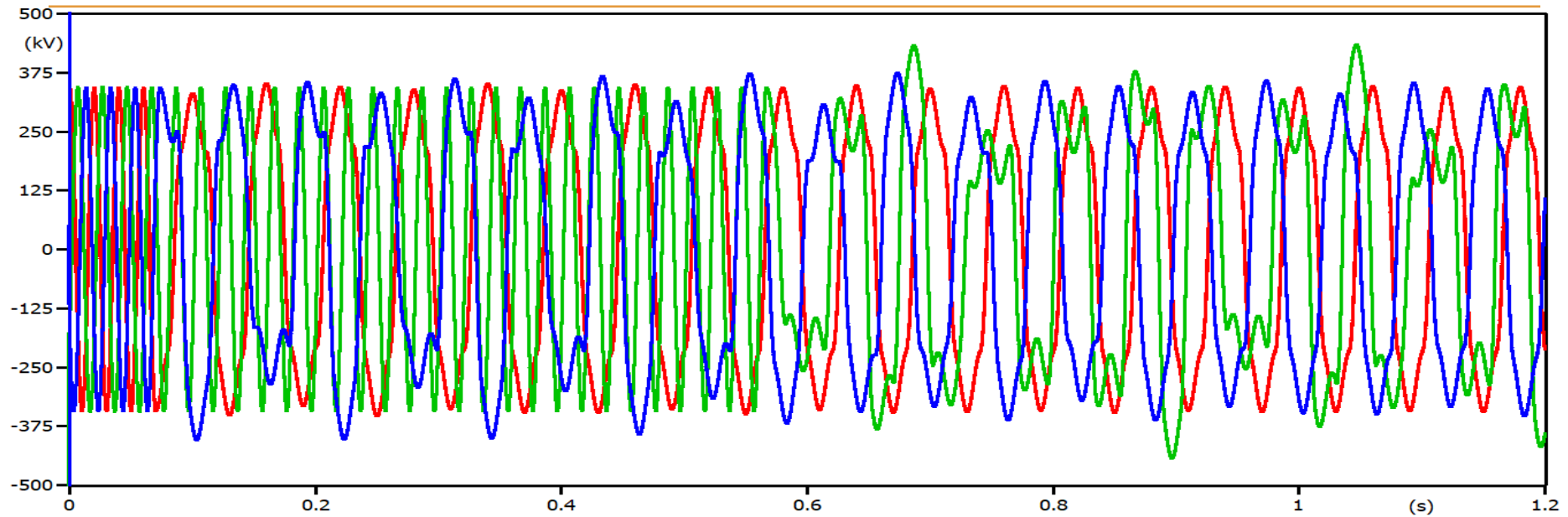
מפ'ז מופסק ומפ'ז עם אי אחידות מופע B

מפסקים מופסקים(pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(MΩ)	$\varphi(^{\circ})$	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
2-400	3280	3200	1066.6	0	A=65 ; B=565; c=65	ללא	50

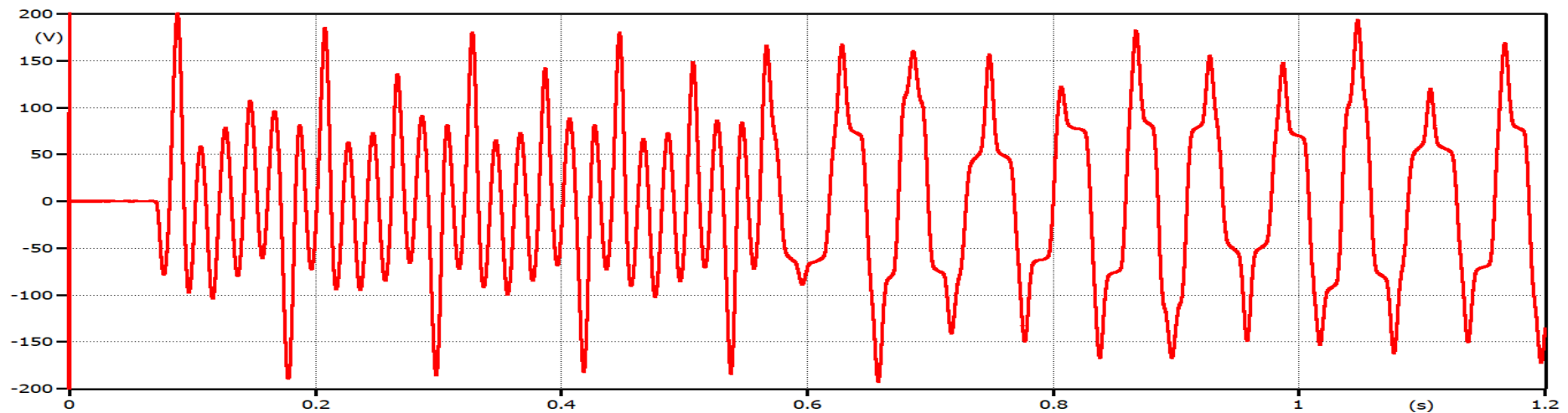


(file Henry3PHOpenDelta400kv.pl4; x-var t) c:XX0011-XX0003 c:XX0027-XX0019 c:XX0042-XX0035

מפ'ז מופסק ומפ'ז עם אי אחידות מופע B



(file Henry3PHOpendedelta400kv.pl4; x-var t) v:XX0008 v:XX0024 v:XX0039

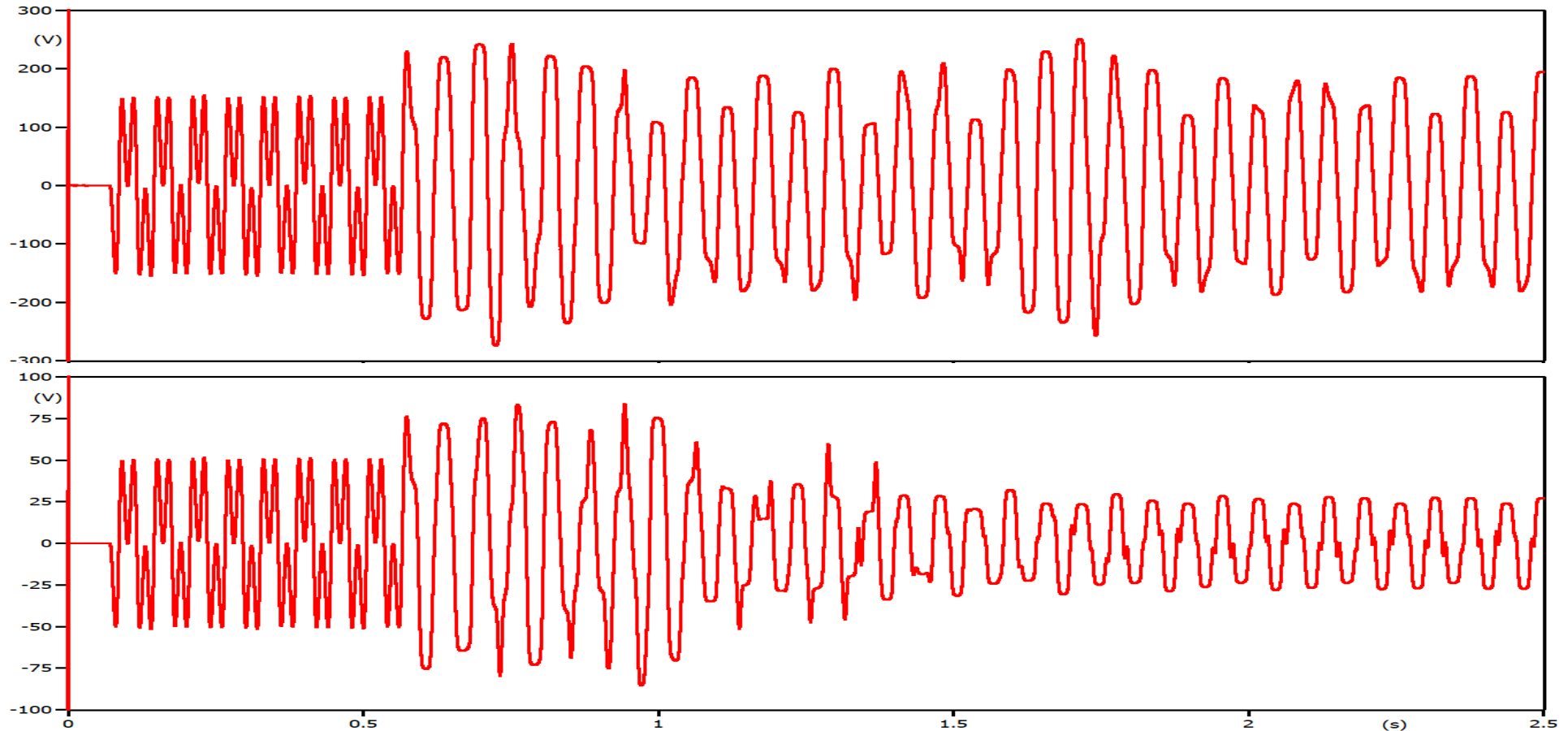


(file Henry3PHOpendedelta400kv.pl4; x-var t) v:XX0049

C+B עם יחס שנאי מתח במשני

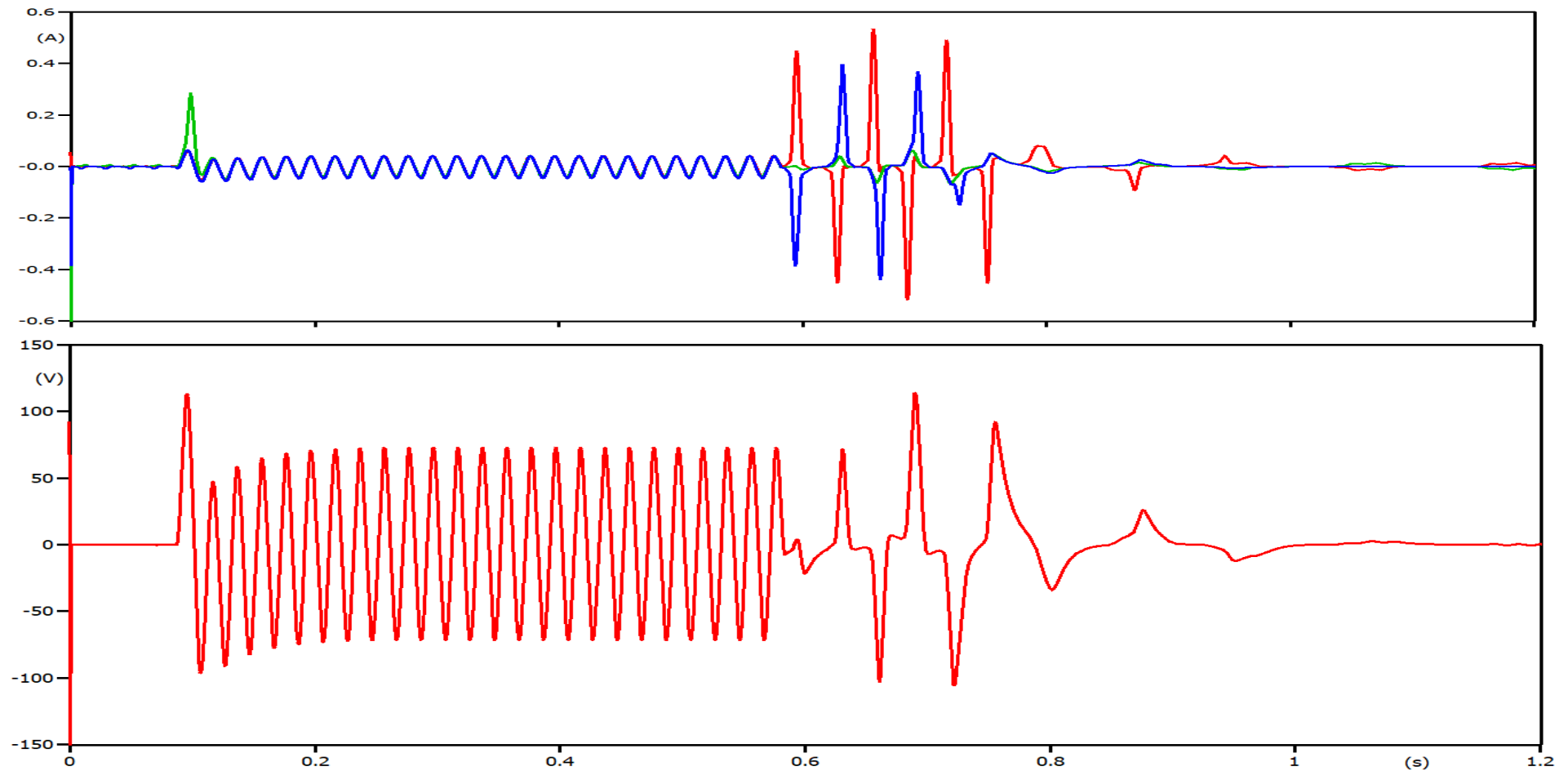
$[400000/\sqrt{3}]/[110/\sqrt{3}]$ or $[110/3]$

מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(MΩ)	$\varphi(^{\circ})$	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
2-400	3280	3200	1066.6	0	A=65 ; B=565; c=565	ללא	50



שני מפסקים אי אחידות C+A

מפסקים מופסקים (pF)	Cs Total (pF)	GC (pF)	Rm(MΩ)	$\varphi(^{\circ})$	CB open time (mS)	R damp(Ω)	Burden(%)
2-400	3280	3200	1066.6	270	A=580 ; B=80; c=580	0.5	50



סיכום הממצאים ומסקנות

1. תופעת ה FERRORESONANCE מושפעת מאוד מתופעות מעבר שהרשת חשה.
2. יש לקחת בחשבון את התופעה מהיבט התכנון, השינויים ברשת ההולכה והמשטר התפעולי.
3. כאשר שלושת המופעים היו במצב תהודה ברזלית, נתקבלה מערכת תלת מופעית יציבה מאוד בתדר $1/3$, מאוזנת במתחים אך אינה סימטרית, אלא, בהזנת מופע של 40° , 80° או 160° בין הפאזות, ובכל פעם בסדר התחלתי אחר.
4. לזווית המיתוג להפסקת המפ"ז קיימת השפעה גבוהה על קיום תנודות התהודה הברזלית, ביחס למקור האספקה הקשיח.

IMPACT OF FERRORESONANCE

1. מתח ארעי גבוה בין המופע לאדמה
2. הופעת זרמי יתר באופן מתמיד
3. צורות הגל של המתח והזרם מעוותות במערכת
4. כשל תרמי ודיאלקטרי של הציוד
5. הזדקנות הציוד
6. עלולה לגרום לפעולה לא נכונה של ממסרי הגנה
7. MAGNETOSTRICTION



המלצות ליישום

1. היבטי תכנון
2. שימוש בשנאי מתח ביחס תמסורת $[400000/\sqrt{3}] / [110/3]$
3. ניטור משטר תפעול תקין במערכת
4. התקנת נגד ריסון 0.5Ω
5. התקנת מתקן לגילוי הרמוניות



תודה רבה

הנרי ברייר

