



جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

حساب محددات الموجات النبضية لولادات التوتر العالي النبضية وقياسها ونمذجتها في ظروف الاختبار المختلفة

رسالة أُمِدَّتْ لَنَيلِ دَرَجَةِ المَاجِسْتِير فِي هِنْدَسَةِ نَظْمِ القُدْرَةِ
الكهربائية

إعداد

الطالبة المهندسة ميرفت صباغ

المشرف العلمي

الدكتور المهندس علي السيد

دمشق 2015/2014

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Power Engineering Department



Calculation, Measurement, and Simulation of Impulse Wave Parameters for High Voltage Impulse Generators in Different Conditions

**Thesis Prepared for Master's Degree in Electrical Power
Engineering Department**

Prepared by

Eng.Mirvat Sabbagh

Supervised by

Dr. Ali Alsayed

Academic Year 2014/2015

كلمة شكر

الشكر أولاً وأخيراً لله عزّ وجلّ الذي أعانني ووفّقني في تقديم هذه الرسالة، ثم الشكر العميق للدكتور المهندس على السيد . . للجهد والوقت الذي قدمه لي في تحضير هذه الرسالة

لم يكن يوماً مقصراً في مساعدتي وإرشادي باستمرار برغم الظروف الصعبة التي مررنا فيها ومرّ فيها كل إنسان في وطني الغالي، ليبقى حب الوطن والرغبة في تطويره هو الهدف الأول لنا .

الإهداء

إلى: من يعيش حبها في قلبي واخترت حروفها ضوء الشمس الذي لا يغيب . . .

سوريا

إلى: ينبع الحب والحنان من علموني أن العلم سلاحه والأخلاق طريقتي . . .

أهلي.

إلى: النجوم المضيئة في سماء حياتي . . .

ميّار بشار نوار

إلى: الرجل الذي أرى من خلاله ذاتي مصدر إلهامي ونور معرفتي، مساعدتي مشجعي . . .

زوجي

الفصل الأول

الدراسة المرجعية

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

الفصل الثالث

الدراسة العملية

Contents

i.....	الفهرس
iv.....	الأشكال
vii.....	الجداول
viii.....	الهدف من البحث
ix.....	المقدمة
1.....	الفصل الأول
1.....	الدراسة المرجعية
1.....	1-1: الدراسة المرجعية الأولى:
3.....	2-1: الدراسة المرجعية الثانية:
6.....	3-1: الدراسة المرجعية الثالثة:
9.....	4-1: الدراسة المرجعية الرابعة:
11.....	5-1: الدراسة المرجعية الخامسة:
13.....	6-1: الدراسة المرجعية السادسة:
17.....	الفصل الثاني
17.....	الدراسة النظرية
17.....	1-2: التوترات النبضية الزائدة:
17.....	1-1-2: التوترات الزائدة الداخلية: [8]
20.....	2-1-2: التوترات الزائدة الخارجية:
21.....	1-2-1-2: فيزيائية حدوث الصواعق: [9]
23.....	2-2-1-2: مراحل نمو الانفراغ البرقي:
25.....	3-2-1-2: القيم المميزة للصاعقة:
26.....	4-2-1-2: أثر الصواعق على شبكات نقل القدرة:
29.....	5-2-1-2: أزمنة الموجات النبضية:
31.....	2-2: توليد التوترات العالية النبضية: [10]
31.....	1-2-2: التوترات النبضية فصل وصل:
32.....	2-2-2: التوترات النبضية البرقية:

33.....	3-2: مولدات التوتر العالي النبضي:
33.....	1-3-2: مولد التوتر النبضي وحيد المرحلة:
36.....	2-3-2: مولدات التوتر العالي النبضية متعددة المراحل (مولد ماركس):
38.....	3-3-2: حساب توصيلات مولدات التوتر النبضي: [7] و [11]
41.....	4-3-2: حساب زمن الجبهة Ts وزمن نصف الظهر Tr:
43.....	الفصل الثالث
43.....	الدراسة العملية
43.....	المقدمة
43.....	1-3: الدراسة العملية:
44.....	2-3: نتائج المرحلتين الأولى والثانية (المخبرية والحسابية):
45.....	1-2-3: أثر تغير المقاومة Rd في التوصيلة (B) على أزمنة الموجة:
49.....	2-2-3: أثر تغير المقاومة Re في التوصيلة (B) على أزمنة الموجة:
53.....	3-2-3: أثر تغيير قيمة سعة الحمل Cb على أزمنة الموجة:
55.....	4-2-3: أثر تغير المقاومة Rd في التوصيلة (A) على أزمنة الموجة:
59.....	5-2-3: أثر تغير المقاومة Re في التوصيلة (A) على أزمنة الموجة:
64.....	6-2-3: أثر تغيير قيمة سعة الحمل Cb على ازمدة الموجة:
66.....	7-2-3: اثر إضافة حمل سعوي CP للدائرة التوصيلة (B) على أزمنة الموجة النبضي:
69.....	8-2-3: اثر إضافة حمل سعوي CP للدائرة التوصيلة (A) على ازمدة الموجة النبضية:
71.....	3-3: الطريقة البرمجية باستخدام البيئة GUI:
73.....	1-3-3: نتائج نمذجة المولد النبضي مرحلتين، توصيلة (A):
77.....	2-3-3: نتائج نمذجة المولد النبضي مرحلتين، التوصيلة (B):
79.....	4-3: نتائج المرحلة الرابعة:
90.....	5-3: نمذجة المولد النبضي باستخدام بيئة Matlab-Simulink:
91.....	1-5-3: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B ذو مرحلة واحدة:
93.....	2-5-3: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B ذو مرحلتين:
95.....	3-5-3: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة A ذو مرحلة واحدة:

96.....	3-5-4: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة A ذو مرحلتين:
99.....	النتائج والتوصيات
100.....	المراجع

الأشكال

- الشكل (1-1) نموذج لمولد نبضي برقي وحيد المرحلة 2
- الشكل (2-1) شكل موجة الخرج عند تغير مقاومة الشحن R_d 2
- الشكل (3-1) شكل موجة الخرج عند تغير مقاومة التفريغ R_e 3
- الشكل (4-1) دائرة النمذجة لمولد نبضي ذو ثمان مراحل 4
- الشكل (5-1) شكل موجة الخرج عند مقاومة الشحن $R_d=160\Omega$ 4
- الشكل (6-1) شكل موجة الخرج عند مقاومة الشحن $R_d=315\Omega$ 5
- الشكل (7-1) شكل موجة الخرج عند مقاومة التفريغ $R_e=2981\Omega$ 5
- الشكل (8-1) شكل موجة الخرج عند مقاومة التفريغ $R_e=3085\Omega$ 6
- الشكل (9-1) دائرة مولد نبضي برقي وحيد المرحلة 7
- الشكل (10-1) دائرة النمذجة لمولد نبضي ذو مرحلة واحدة 7
- الشكل (11-1) موجة توتر الخرج الناتجة عن عملية النمذجة 8
- الشكل (12-1) دائرة النمذجة لمولد نبضي أربع مراحل 8
- الشكل (13-1) شكل موجة توتر الخرج 9
- الشكل (14-1) موجة الخرج الناتجة عن عملية النمذجة 10
- الشكل (15-1) موجة الخرج عند تغير L 11
- الشكل (16-1) دائرة المولد العملي الموجود في مخابر التوتر العالي - المانيا 12
- الشكل (17-1) واجهة البرنامج مع شكل موجة الخرج الناتجة 12
- الشكل (18-1) واجهة البرنامج مع عناصر تعويض تفرعي وتسلسلي 13
- الشكل (19-1) دائرة ثلاث مراحل بدون السعة الشاردية 14
- الشكل (20-1) موجة الخرج بدون السعة الشاردية 14
- الشكل (21-1) دائرة ثلاث مراحل مع السعة الشاردية 15
- الشكل (22-1) موجة الخرج مع السعة الشاردية 15
- الشكل (23-1) موجة الخرج مع السعة الشاردية وتغير توتر الشحن 16
- الشكل (1-2) الدارة الكهربائية لنظام قدرة كهربائي 17
- الشكل (2-2) حدوث الاهتزاز على منحنى التوتر 18
- الشكل (3-2) شبكة ذات نقطة نجمية مع قصر احد الاطوار 19
- الشكل (4-2) شكل موجة التوتر الزائد التوصيلي 20
- الشكل (5-2) شكل موجة التوتر البرقية 21
- الشكل (6-2) توزيع الشحنات الموجبة والسالبة في الغيمة 22
- الشكل (7-2) مراحل تطور الانفراغ البرقي 24
- الشكل (8-2) حدوث الصاعقة 24
- الشكل (9-2) المسار الزمني لتيار صاعقة سالبة 25
- الشكل (10-2) المسار الزمني لتيار صاعقة موجب 26
- الشكل (11-2) مكان الاصابة المباشرة بالصاعقة 27
- الشكل (12-2) مكان الاصابة غير المباشرة بالصاعقة 27
- الشكل (13-2) عملية فصل الشحنات الكهربائية 28
- الشكل (14-2) الموجة النبضية 30
- الشكل (15-2) موجة البرق النظامية 31
- الشكل (16-2) المنحنى الزمني لموجة التوتر فصل_وصل 32
- الشكل (17-2) المنحنى الزمني لموجة التوتر النبضي البرقي 32

- الشكل (18-2) دائرة المولد النبضي توصيلة A..... 33
- الشكل (19-2) دائرة المولد النبضي توصيلة B..... 34
- الشكل (20-2) دائرة مولد توتر عالي نبضي وحيد المرحلة بشكل كامل..... 34
- الشكل (21-2) المنحني الزمني للحصول على التوتر النبضي..... 35
- الشكل (22-2) مولد ماركس متعدد المراحل التوصيلة B والتوصيلة A..... 36
- الشكل (23-2) دائرة الاختبار بمولد ماركس..... 37
- الشكل (24-2) دائرة المولد النبضي توصيلة (A)..... 38
- الشكل (25-2) شكل التوتر النبضي الناتج من تطبيق تابعين أسيين فوق بعضها..... 40
- الشكل (1-3) نموذج دائرة مخبرية لتوليد التوتر العالي النبضي..... 44
- الشكل (2-3) طريقة ربط الراسم مع الحاسب..... 44
- الشكل (2-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d = 110$ 45
- الشكل (4-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d = 0.54 k\Omega$ 46
- الشكل (5-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d = 1$ 47
- الشكل (3-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d = 2.2 k$ 48
- الشكل (6-3) T_r و T_s مع تغير مقاومة الشحن R_d 49
- الشكل (7-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_e = 1 k$ 50
- الشكل (8-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_e = 2.2 k$ 51
- الشكل (9-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_e = 4.7 k$ 52
- الشكل (10-3) علاقة T_r و T_s مع تغير R_e 53
- الشكل (11-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 10 nF$ 53
- الشكل (12-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 100 nF$ 54
- الشكل (13-3) علاقة T_r و T_s مع تغير C_b 55
- الشكل (14-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d = 110 k$ 56
- الشكل (15-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d = 0.54 k$ 57
- الشكل (16-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d = 2.2 k$ 58
- الشكل (17-3) علاقة T_r و T_s مع تغير R_d 59
- الشكل (18-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_e = 1 k$ 60
- الشكل (19-3) الموجة النبضية الناتجة عن $\Omega R_e = 2.2 k$ 61
- الشكل (20-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_e = 4.7$ 62
- الشكل (21-3) علاقة T_r و T_s مع تغير R_e 63
- الشكل (22-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 10 nF$ 64
- الشكل (23-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 100 nF$ 65
- الشكل (24-3) علاقة كل من T_r و T_s مع تغير C_b 66
- الشكل (25-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p = 10 nF$ 67
- الجدول (24-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $C_p = 10 nF$ 67
- الشكل (26-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p = 100 nF$ 68
- الشكل (27-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p = 10 nF$ 69
- الشكل (28-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p = 100 nF$ 70
- دائرة لمولد النبضي توصيلة A..... 72
- دائرة المولد النبضي توصيلة B..... 72
- الشكل (29-3) واجهة البرنامج التنفيذية..... 73
- الشكل (30-3) المولد النبضي العملي الموجود في المخبر..... 74
- الشكل (31-3) واجهة الإدخال لبرنامج الحساب توصيلة A..... 76

76.....	الشكل (32-3) موجة الخرج الناتجة التوصيلة A
77.....	الشكل (33-3) تغير مميزات موجة التوتر مع تغير عناصر المولد
77.....	الشكل (34-3) واجهة الإدخال للبرنامج للتوصيلة B
78.....	الشكل (35-3) موجة الخرج الناتجة التوصيلة B
78.....	الشكل (36-3) موجة الخرج مع تغير عناصر المولد
79.....	الشكل (37-3) دائرة المولد النبضي البرقي توصيلة B
79.....	الشكل (38-3) واجهة Simulink Library Browser
80.....	الشكل (39-3) ادخال قيمة منبع التوتر المستمر في واجهة Electrical Source
81.....	الشكل (40-3) واجهة المكتبة الفرعية Element
81.....	الشكل (41-3) واجهة المكتبة الفرعية Element
82.....	الشكل (42-3) واجهة المكتبة Power Electronics لادخال محددات القاطع IGBT2
83.....	الشكل (43-3) واجهة المكتبة Simulink لاختيار دائرة توليد النبضات
83.....	الشكل (44-3) واجهة المكتبة الفرعية Pulse Generator لاختيار محددات دائرة توليد النبضات
84.....	الشكل (45-3) دائرة النمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B
85.....	الشكل (46-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلة واحدة
86.....	الشكل (47-3) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين
87.....	الشكل (48-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين
87.....	الشكل (49-3) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A
88.....	الشكل (50-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة
90.....	الشكل (52-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلتين
91.....	الشكل (53-3) نمذجة دار ةشحن Cs
92.....	الشكل (54-3) نمذجة دائرة تفريغ Cs
92.....	الشكل (55-3) نمذجة دائرة مولد نبضي برقي توصيلة B مرحلة واحدة
93.....	الشكل (56-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلة واحدة
94.....	الشكل (57-3) دائرة نمذجة مولد توتر نبضي برقي توصيلة B مرحلتين
95.....	الشكل (58-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين
95.....	الشكل (59-3) دائرة نمذجة مولد نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة
96.....	الشكل (60-3) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة
97.....	الشكل (61-3) دائرة نمذجة مولد توتر نبضي برقي توصيلة A مرحلتين
97.....	الشكل (62-3) خرج مولد توتر نبضي برقي توصيلة A مرحلتين

الجداول

5	الجدول (1-1) تغيير مقاومة الشحن R_d
6	الجدول (2-1) تغيير مقاومة التفريغ R_e
11	الجدول (3-1) تغيير قيم الحمل التحريضي
39	الجدول (1-2) قيم الثوابت حسب نوع التوصيلة
42	الجدول (2-2) قيم الأزمنة بدلالة عناصر دائرة المولد
42	الجدول (3-2) قيم الثوابت b و a لأربع موجات مختلفة
45	الجدول (1-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=110\Omega$
46	الجدول (2-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=0.54k\Omega$
47	الجدول (3-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=1k\Omega$
48	الجدول (4-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=2.2k\Omega$
48	الجدول (5-3) نتائج تغيير المقاومة R_d بثبات بقية عناصر الدارة
50	الجدول (6-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e=1k\Omega$
51	الجدول (7-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e=2.2k\Omega$
52	الجدول (8-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e=4.7k\Omega$
52	الجدول (9-3) نتائج تغيير مقاومة التفريغ R_e بثبات بقية عناصر المولد
54	الجدول (10-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند تغيير سعة الحمل $C_b=10nf$
54	الجدول (11-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند تغيير سعة الحمل $C_b=100nf$
55	الجدول (12-3) نتائج تغي C_b بثبات بقية عناصر المولد
56	الجدول (13-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=110\Omega$
57	الجدول (14-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=0.54k\Omega$
58	الجدول (15-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=2.2k\Omega$
58	الجدول (16-3) تغيير R_d بثبات بقية عناصر المولد
60	الجدول (17-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=1k\Omega$
61	الجدول (18-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=2.2k\Omega$
62	الجدول (19-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=4.7k\Omega$
62	الجدول (20-3) تغيير مقاومة التفريغ R_e بثبات بقية عناصر المولد
64	الجدول (21-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_b=10nf$
65	الجدول (22-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_b=100nf$
65	الجدول (23-3) تغيير قيمة C_b بثبات بقية عناصر المولد
67	الجدول (24-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $C_p=10nF$
68	الجدول (25-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $C_p=100nF$
69	الجدول (26-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_p=10nF$
70	الجدول (27-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_p=100nF$
70	الجدول (28-3) تغيير حمل سعوي C_p للتوصيلة B
71	الجدول (29-3) تغيير حمل سعوي C_p للتوصيلة A

الهدف من البحث

تفرض المواصفات القياسية العالمية إجراء الاختبارات بالتوترات النبضية البرقية للتجهيزات والعوازل المستخدمة في شبكات التوتر العالي، بسوياته المختلفة Kv (20,66,230,400) بمحددات للموجة النبضية هي (المطال - الزمن الجبهي - زمن نصف الظهر - القطبية وتكرار النبضات).

بما أن محدّدات الموجة النبضية تتغير مع تغير عناصر دائرة المولد النبضي بما فيها العينة المختبرة، ولضمان الحصول على موجة نبضية مطابقة لمتطلبات المواصفات القياسية العالمية يجب تصميم المولدات النبضية بشكل صحيح وذلك بناء على حسابات رياضية للدوائر المكافئة للمولد النبضي (مرحلة واحدة أو متعدد المراحل) لتحديد سعات ومقاومات الشحن والتفريغ.

إن تصميم المولدات النبضية يتم باستخدام علاقات رياضية تقريبية لذلك يتوجب التحقق منها مخبرياً، لذلك سوف يتم التوجيه في هذا البحث إلى إجراء عمليات نمذجة لدوائر المولد النبضي بالتوصيلتين (A,B) لمرحلة واحدة أو متعدد المراحل (مولد ماركس)، وذلك من أجل تسهيل عملية التصميم، ثم إجراء مقارنة نتائج عمليات النمذجة مع نتائج القياس المخبرية والحسابية لتحديد صلاحية عملية النمذجة.

المقدمة

إن تصميم واختبار العوازل والتجهيزات المستخدمة في شبكات التوتر العالي لا يتحدد فقط بشروط عمل هذه العوازل عند الظروف النظامية، بل وبصورة أكبر بشروط عملها الفعلية والطارئة. وتغلب في هذا المجال التغيرات المناخية والبيئية التي يمكن أن تتعرض لها هذه التجهيزات وتعمل على تغيير السلوكية الكهربائية لها بالمقارنة مع سلوكيتها في الظروف الجوية النظامية.

لذا يجب أن تصمم هذه العوازل والتجهيزات بحيث تتحمل الإجهادات الكهربائية دون حدوث أي انهيار، وقد بات الاختبار الصحيح لتلك التجهيزات بحيث يضمن حسن أداء عمل الشبكة الكهربائية في حماية التجهيزات من التوترات الزائدة ذات المنشأ الخارجي (الصواعق) أو من التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي (فصل وصل).

تتعرض خطوط نقل وتوزيع القدرة الكهربائية إلى الإصابة بالضربات البرقية التي تسبب انفراغات تعرض توترات زائدة في هذه الشبكات وينتشر هذا الارتفاع المفاجئ في التوتر على شكل موجة مسافرة على طرفي نقطة الإصابة حتى تصل إلى المحطة وتؤدي إلى انهيار العوازل والتجهيزات أو إصابة الأجزاء الحساسة غير المحمية في المحطات.

لذلك يتم اختبار هذه التجهيزات بتوترات مكافئة للإجهادات العظمى التي يمكن أن تتعرض لها الشبكة أثناء العمل وخاصة الاختبار بالتوترات النبضية البرقية.

الفصل الأول

الدراسة المرجعية

تهدف الدراسة المرجعية إلى التعرف على آخر الأبحاث المتعلقة بدراسة المولدات النبضية ونمذجتها و تغيير مميزات الموجة النبضية مع تغيير عناصر دارة المولد النبضي وذلك لضمان الحصول على موجات نبضية مطابقة للنظم العالمية IEC. وبالرجوع إلى هذه الأبحاث، تبين وجود العديد من الدراسات نذكر منها:

1-1: الدراسة المرجعية الأولى:

أجريت هذه الدراسة [1] في الهند عام 2012 وهي بعنوان:
نمذجة مولد توتر نبضي برقي واختبار عازل بهذا التوتر باستخدام برنامج MATLAB/Simulink.

Simulation of Impulse Voltage Generator and Impulse Testing of Insulator using MATLAB Simulink.

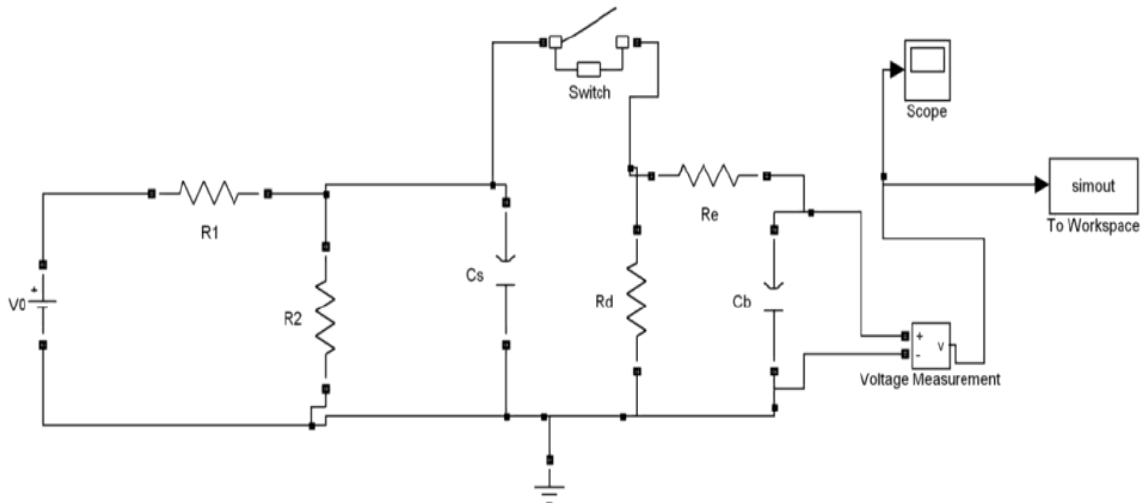
للباحثين:

S.Ramleth, J. Madhavan, K.Thangal ,S.Nediyazhikam

نشرت هذه المقالة في المجلة العالمية للنمذجة والمحاكاة -بريطانيا عام 2012

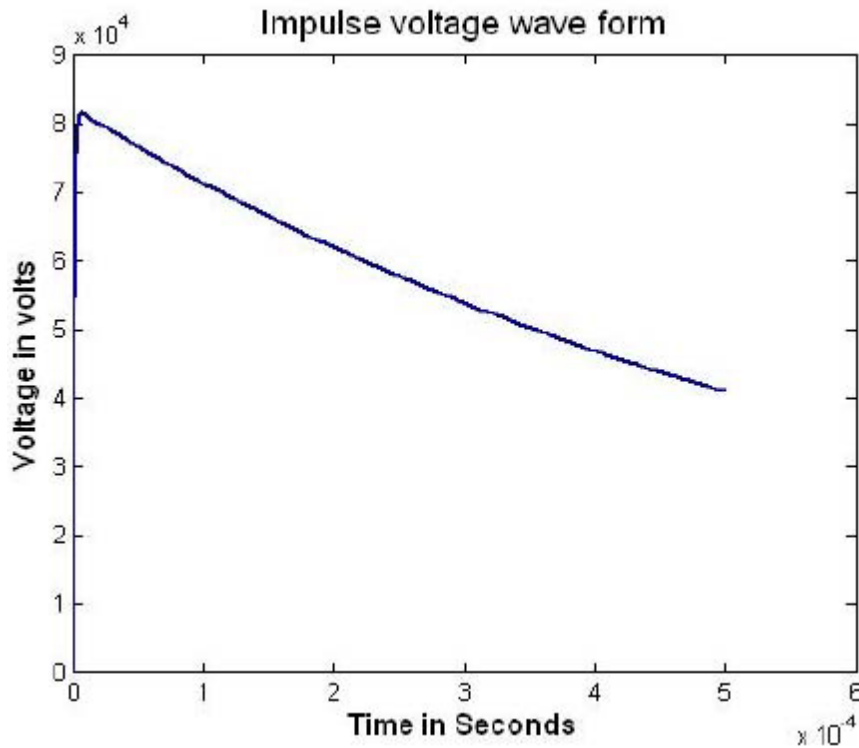
وتتلخص هذه الدراسة في نقطتين:

الأولى تصميم مولد توتر نبضي برقي ثم إجراء الاختبار بهذا التوتر على عازل قبلي مخبرياً. والثانية فهي تطوير نموذج باستخدام برنامج Matlab يطابق التجهيزات المخبرية المشار إليها سابقاً. وقد بينت الاختبارات أن البرمجيات المستخدمة فعالة جداً في دراسة تأثير تغيير المحددات في التصميم للحصول على شكل نبضة البرق المطلوبة من مولد التوتر النبضي والمراد استخدامه في تجهيزات التوتر العالي. و يبين الشكل (1-1) نموذج لمولد نبضي برقي وحيد المرحلة وذلك باستخدام MATLAB/Simulink.

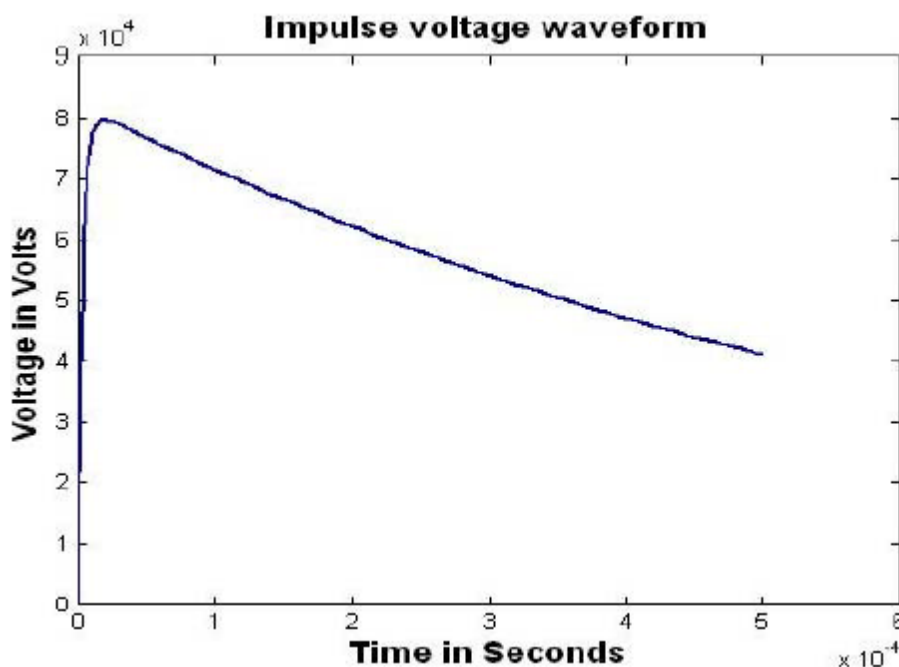


الشكل (1-1) نموذج لمولد نبضي برقي وحيد المرحلة

تبيين الأشكال (2-1) و (3-1) شكل موجة الخرج الناتجة من عمليات النمذجة وذلك بتغيير كل من R_d مقاومة الشحن و R_e مقاومة التفريغ.



الشكل (2-1) شكل موجة الخرج عند تغيير مقاومة الشحن R_d



الشكل (3-1) شكل موجة الخرج عند تغير مقاومة التفريغ R_e

حيث دلت النتائج على أن المقاومة R_d تؤثر على زمن الجبهة وأن المقاومة R_e تؤثر على زمن نصف الظهر.

2-1: الدراسة المرجعية الثانية:

أجريت هذه الدراسة [2] في الهند - عام 2013 وهي بعنوان :

تصميم مولدات نبضية بأزمة جبهة ونصف الظهر لاختبار محولات القدرة.

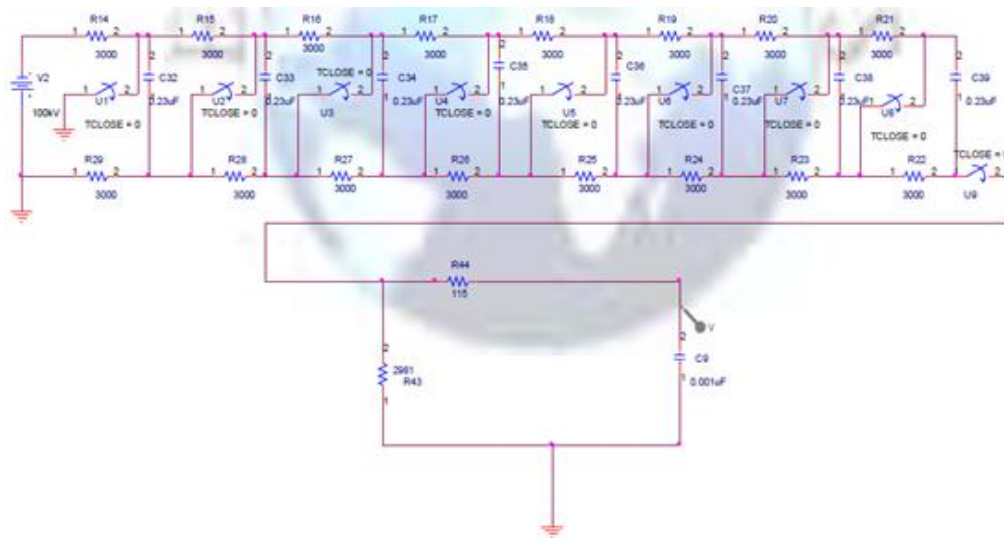
Design of impulse generators for different frontand Tail Resistors in Impulse voltagetesting of power transformers

للباحثين:

N. Preeti, Prof. P. Arun

نشرت هذه المقالة في المجلة الدولية للبحوث في تعزيز العلوم والتكنولوجيا والهندسة عام 2013 تم في هذه الدراسة نمذجة مولد توتر نبضي ذو ثمان مراحل وذلك من أجل اختبار محولات القدرة. ويبين

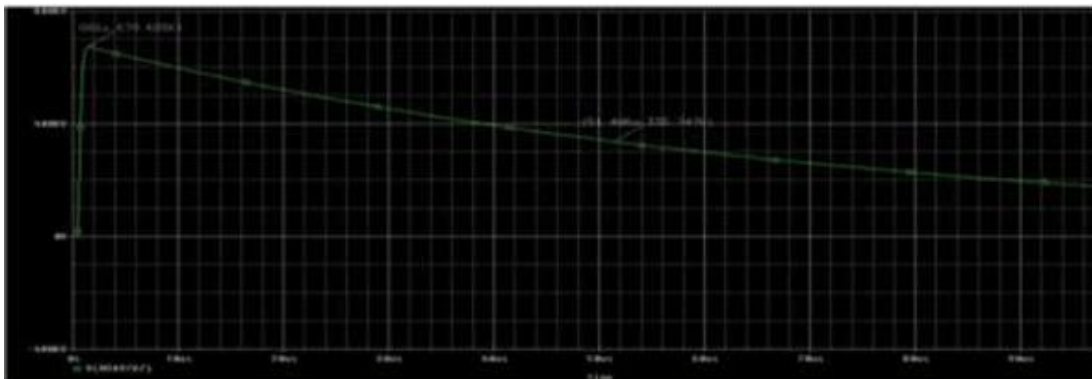
الشكل (4-1) دائرة النمذجة لمولد نبضي ذي ثمان مراحل باستخدام برمجيات PSpice software



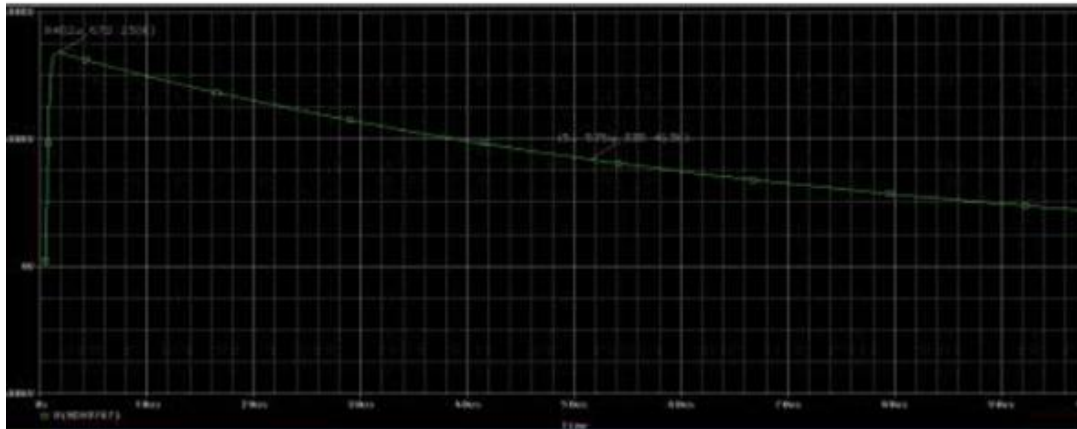
الشكل (1-4) دائرة النمذجة لمولد نبضي ذو ثمان مراحل

وقد تم في هذه الدراسة دراسة تغير كل من R_d و R_e على زمن الجبهة وزمن نصف الظهر أي على شكل موجة الخرج الناتجة حيث لدينا حالتين: الأولى تغيير مقاومة الشحن R_d والثانية تغيير مقاومة التفريغ R_e ومشاهدة شكل الموجة مع ملاحظة تغير كل من زمن الجبهة وزمن نصف الظهر.

أ-تغيير مقاومة الشحن R_d :



الشكل (1-5) شكل موجة الخرج عند مقاومة الشحن $R_d = 160\Omega$



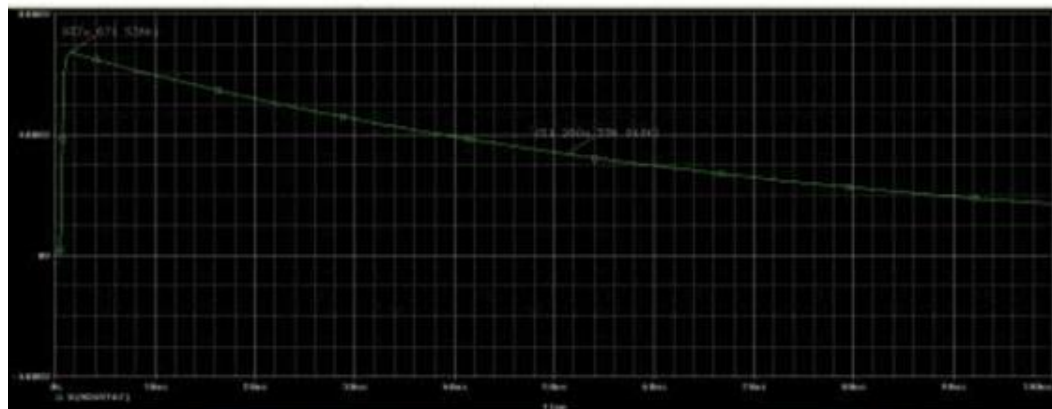
الشكل (1-6) شكل موجة الخرج عند مقاومة الشحن $R_d=315\Omega$

يبين الجدول (1-1) التالي قيم عناصر الدارة مع تغيير مقاومة الشحن R_d وقيم الازمنة المقابلة لها.

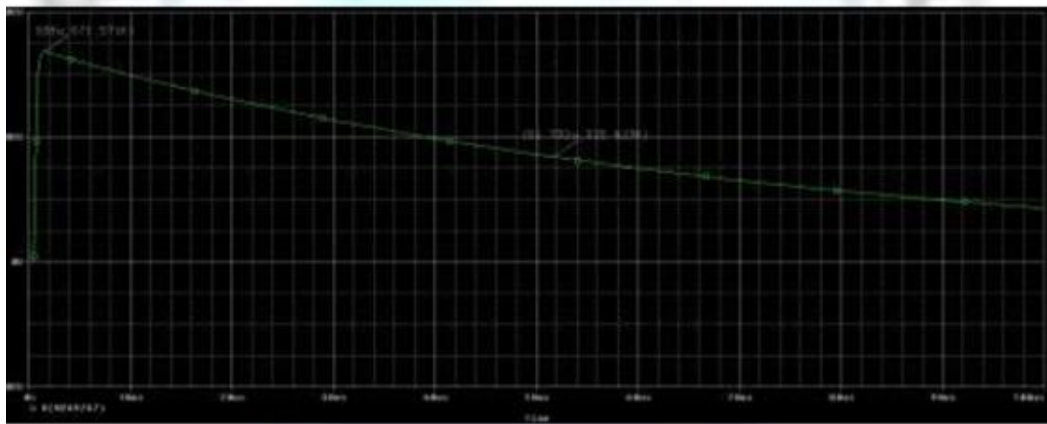
الجدول (1-1) تغيير مقاومة الشحن R_d

curve	V(kv)	Cg(uf)	R1(ohm)	R2(ohm)	Cl(uf)	Vp(kv)	T1(us)	T2(us)
1	100	0.23	160	2981	0.001	671.536	1.3937	51.260
2	100	0.23	170	2981	0.001	670.685	1.4001	51.496
3	100	0.23	180	2981	0.001	670.230	1.8402	51.575
4	100	0.23	227	2981	0.001	669.842	1.9007	51.811
5	100	0.23	315	2981	0.001	666.810	2.0067	52.205

ب-تغيير مقاومة التفريغ R_e



الشكل (1-7) شكل موجة الخرج عند مقاومة التفريغ $R_e=2981\Omega$



الشكل (8-1) شكل موجة الخرج عند مقاومة التفريغ $Re=3085\Omega$

يبين الجدول (2-1) التالي قيم عناصر الدارة مع تغيير مقاومة التفريغ Re وقيم الازمنة المقابلة لها.

الجدول (2-1) تغيير مقاومة التفريغ Re

Curve	V(kv)	Cg(uf)	R1(ohm)	R2(ohm)	C1(uf)	Vp(kv)	T1(us)	T2(us)
1	100	0.23	160	2981	0.001	671.536	1.3937	51.260
2	100	0.23	160	3000	0.001	671.597	1.3938	51.732
3	100	0.23	160	3015	0.001	671.600	1.3940	52.047
4	100	0.23	160	3050	0.001	671.571	1.3938	52.441
5	100	0.23	160	3085	0.001	671.541	1.3939	53.071

3-1: الدراسة المرجعية الثالثة:

أجريت هذه الدراسة الثالثة [3] في ماليزيا عام 2008 وهي بعنوان:

نمذجة المولد النبضي البرقي وخواصه باستخدام برنامج Orcad Pspice.

Impulse Generator and LightningCharacteristics Simulation using Orcad PSpice Software

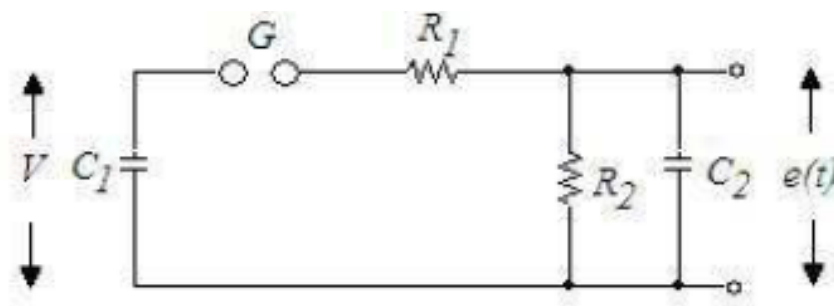
للباحثين:

K.Muhammad, S.Erwan, Md Zarafi Ahmad, Z.Shamsu and Ainul Faiza Othman.

نشرت هذه المقالة في المؤتمر الهندسي 2 في الهندسة المستدامة للبنى التحتية للتطوير وإدارة عام 2008 تهدف هذه الدراسة إلى تطوير مولد نبضي برقي باستخدام البرمجيات Orcad PSpice، وذلك لتوليد موجة توتر نبضي برقي موافقة للمواصفات القياسية (IEC 61000-4-5). وقد استخدم مولد ماركس النبضي البرقي عند تصميم المولد النبضي وكافة عناصره المحددة. ثم أجريت مقارنة بين خرج المولد النبضي

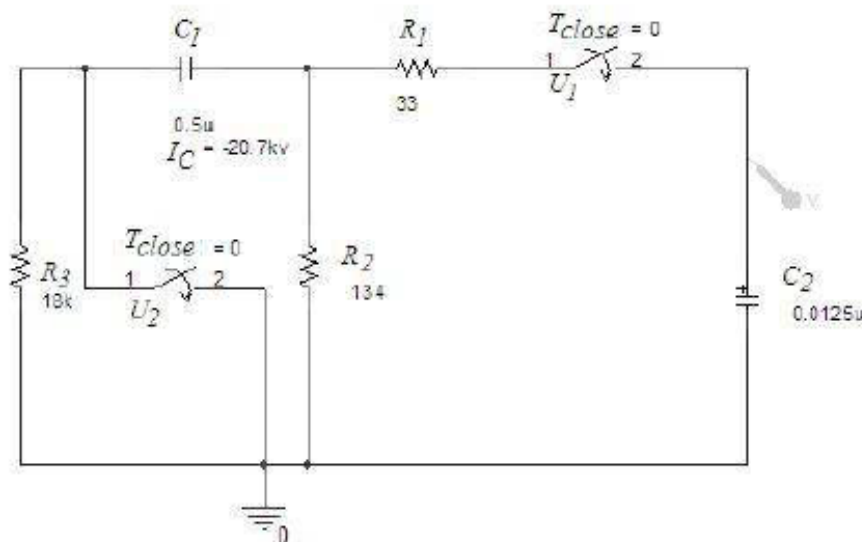
المصمم وموجة برق متوافقة مع المواصفة المذكورة. ثم أجريت مقارنة بين نبضة برق طبيعي مع موجة مرجعية وذلك كدليل على التشابه فيما بينها.

كما تم اختيار عناصر الدارة بحيث تكون خواص وشكل الموجة ضمن الحدود المقبولة. أعطت النتائج موجة برق صحيحة من حيث شكل موجة التوتر مع الزمن وذلك على خرج المولد المصمم باستخدام البرنامج السابق. وفي النتيجة فقد أنجز مولد توتر نبضي برقي يعطي على خرجه نبضة برق صحيحة بكافة عناصرها ويمكن استخدامها في الاختبارات وفي الأبحاث، ويبين الشكل (9-1) دارة مولد نبضي برقي وحيد المرحلة التوصيلة A.



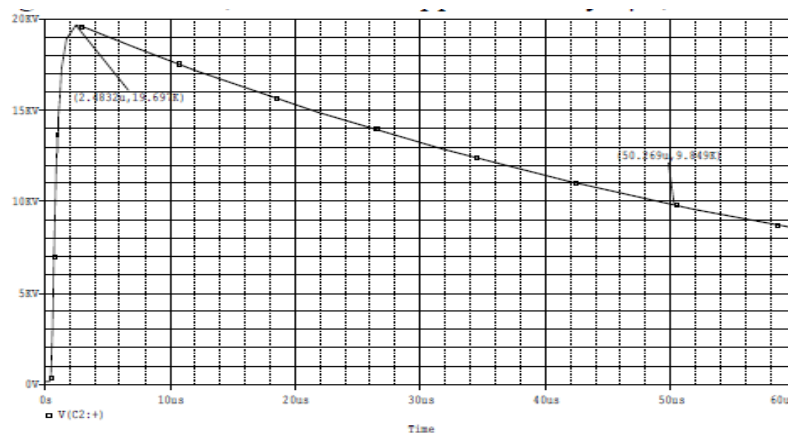
الشكل (9-1) دارة مولد نبضي برقي وحيد المرحلة

يبين الشكل (10-1) دارة النمذجة لمولد نبضي ذو مرحلة واحدة.



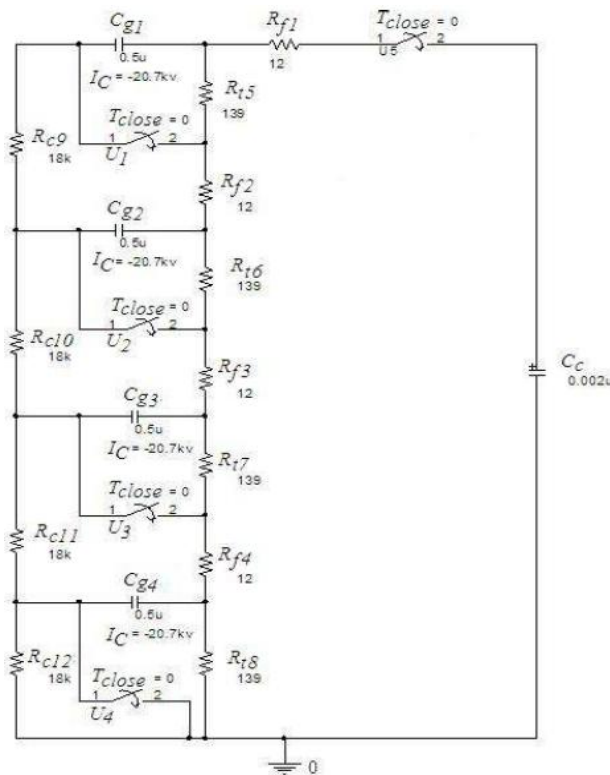
الشكل (10-1) دارة النمذجة لمولد نبضي ذو مرحلة واحدة.

كما يبين الشكل (11-1) موجة توتر الخرج الناتجة عن عملية النمذجة.



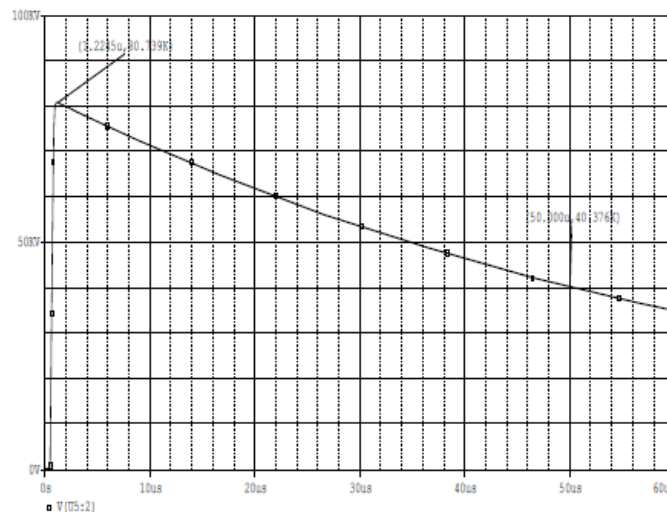
الشكل (11-1) موجة توتر الخرج الناتجة عن عملية النمذجة.

حيث نلاحظ بأن أزمنة هذه الموجة المقاسة هي: الزمن الجبهي للموجة $T_s = 1.2\mu s$ ، زمن نصف الظهر $T_r = 50\mu s$. بينما بلغت القيمة العظمى لتوتر الخرج $U_m = 19.6KV$ بعد ذلك تم نمذجة مولد نبضي متعدد المراحل (أربع مراحل) باستخدام برنامج Orcad PSpice كما في الشكل (12-1).



الشكل (12-1) دائرة النمذجة لمولد نبضي أربع مراحل

يبين الشكل (13-1) شكل موجة توتر الخرج الناتجة عن عملية النمذجة لمولد نبضي أربع مراحل.



الشكل (13-1) شكل موجة توتر الخرج

حيث يمكن خلال هذه الموجة قياس كل من زمن الجبهة T_s وزمن نصف الظهر T_r .

4-1: الدراسة المرجعية الرابعة:

أجريت الدراسة الرابعة [4] في الهند عام 2013 بعنوان:

نمذجة واختبار محاولات الاستطاعة بالتوتر النبضي عند قيم مختلفة للحمل التحريضي باستخدام برمجيات

.PSpice

Simulation and Impulse testing of Power Transformers at different values of inductive load by using PSpice software

للباحثين: Preeti Nair, Prof. Arun Pachori

نشرت هذه المقالة في المجلة الدولية في تعزيز العلوم والتكنولوجيا والهندسة عام 2013

تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة مولد نبضي برقي أو فصل وصل متعدد المراحل وذلك باستخدام برنامج PSpice مع إمكانية تغيير عناصر المولد وذلك للحصول على الأزمدة الجبهية المطلوبة وكذلك أزمدة نصف الظهر وتوتر الخرج المطلوب. ليتم استخدام الموجة الناتجة عن عملية النمذجة في اختيار التجهيزات الكهربائية المستخدمة في الشبكة مثل المحولات والعوازل.

ويبين الشكل (14-1) موجة الخرج البرقية التي تم الحصول عليها من عملية النمذجة وذلك بالزمن الجبهي ونصف الظهر المطلوبين بعد ان تم حسابهما بواسطة القوانين الرياضية العائدة لهذه الدارة.

Mathematical Solution

$$T1 = 3.0 \times R_1 \times \frac{C_g \times C_l}{C_g + C_l}$$

$$T1 = 3.0 \times 360 \times \frac{0.23 \times 0.001}{0.23 + 0.001}$$

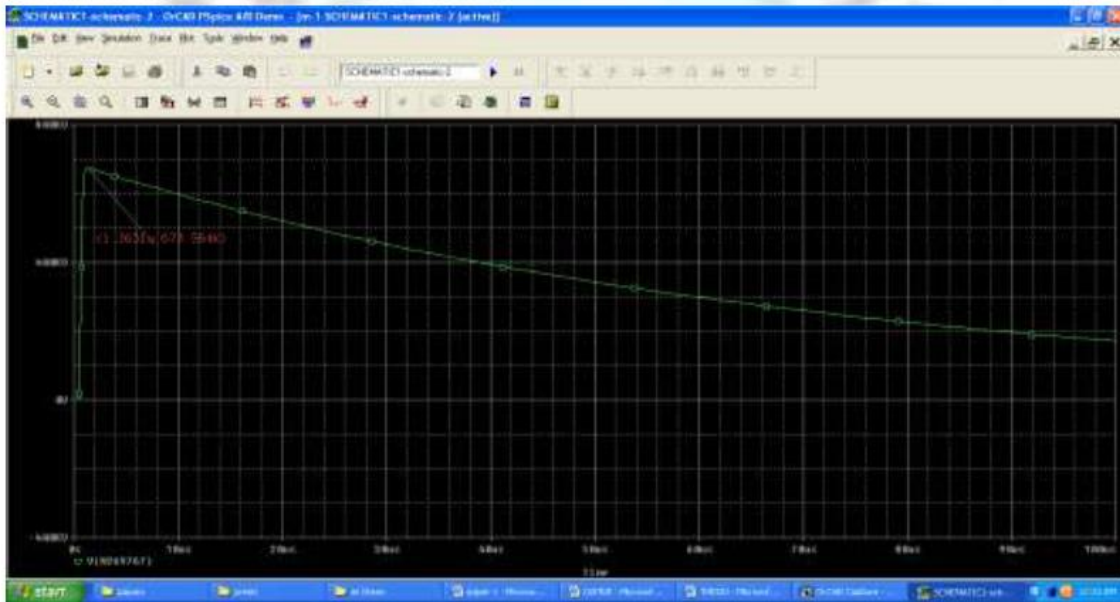
$$T1 = 1.0 \mu$$

$$T2 = .7 \times (R_1 + R_2) \times (C_1 + C_2)$$

$$T2 = .7 \times (360 + 2981) \times (.023 + .001)$$

$$T2 = 49.1 \mu s$$

Graph View

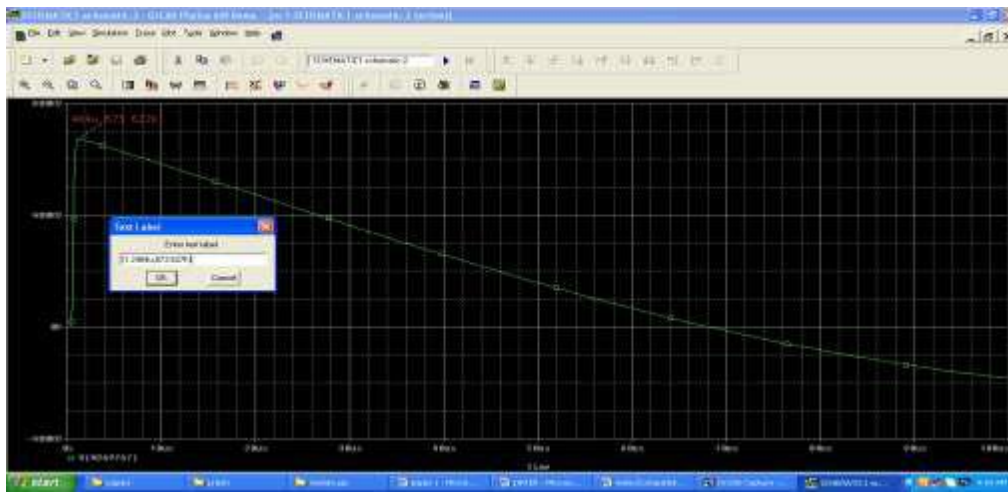


T1 = 1.3 us

T2=51.1 us

الشكل (14-1) موجة الخرج الناتجة عن عملية النمذجة

بعد ذلك تم وضع حمل تحريضي في خرج دائرة المولد 8 مراحل ثم تم تغيير حثية الحمل من اجل معرفة اثر ذلك على محددات الموجة النبضية وقد حصلنا على النتائج التالية:



الشكل (15-1) موجة الخرج عند تغير L

يبين الجدول (3-1) تغيير قيم الحمل التحريضي:

الجدول (3-1) تغيير قيم الحمل التحريضي

Curve	V(Kv)	Cg(μ f)	R ₁ (ohm)	R ₂ (ohm)	Cl(μ f)	L(mh)	Vp(Kv)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)
(1)	100	.02	115	2981	.001	100	673.627	1.2484	32.047
(2)	100	.02	115	2981	.001	200	673.695	1.3014	38.347
(3)	100	.02	115	2981	.001	300	673.616	1.320	41.260
(4)	100	.02	115	2981	.001	400	673.690	1.3119	43.488
(5)	100	.02	115	2981	.001	500	673.721	1.3113	44.354
(6)	100	.02	115	2981	.001	600	673.735	1.3128	45.354

من خلال نتائج جدول تغير قيمة الحثية مع ثبوت بقية عناصر المولد نجد ان زمن الجبهة بقي ثابت بينما تغير زمن نصف الظهر، عند وضع حمل حثي وتغيره في خرج دائرة المولد يؤثر على زمن نصف الظهر ولا يؤثر على زمن الجبهة.

5-1: الدراسة المرجعية الخامسة:

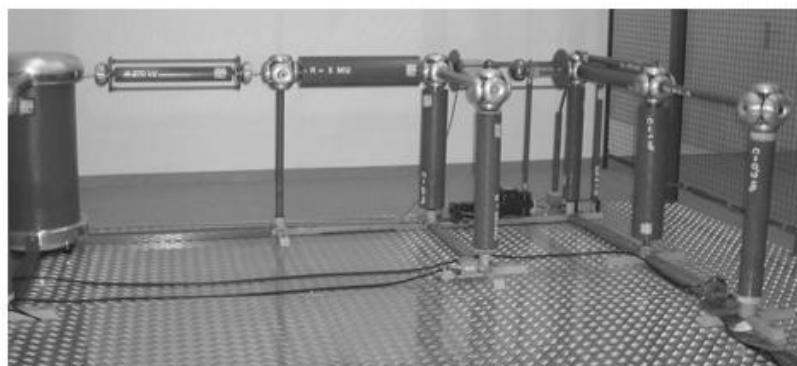
أجريت هذه الدراسة [5] في مخابر هندسة التوتر العالي في ألمانيا - 2002 وهي بعنوان :

تحديد تغيرات مولد التوتر النبضي البرقي لحالات الاختبار المختلفة بمساعدة برنامج حاسوبي.

Determining impulse generator settings for various test cases with the help of a www-based simulation program.

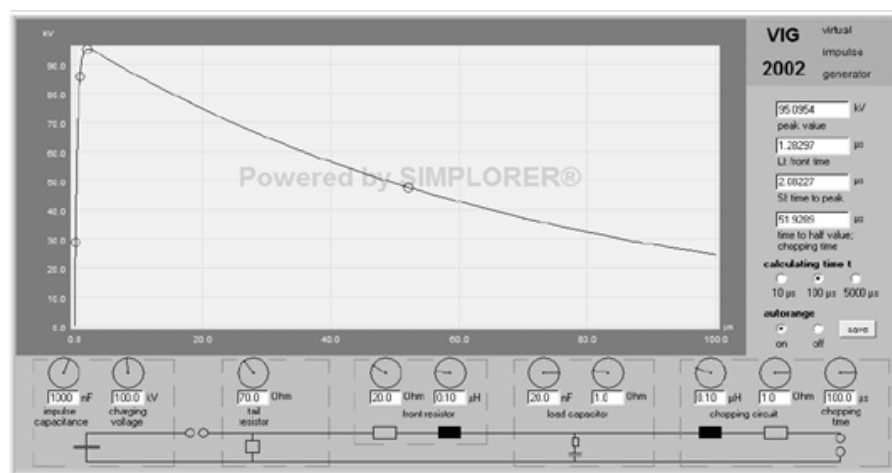
أجريت في مخابر هندسة التوتر العالي في ألمانيا - 2002 للباحثين: S.Wolfgang, P. Ralf.

فقط قام فريق البحث في هذه الدراسة بكتابة برنامج حاسوبي SIMPLORER يسمح بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر مع كافة القيم المطلوبة لتوليد موجة البرق أو موجة الفصل والوصل مع إمكانية إظهار ذلك على واجهة البرنامج الذي يسمح لنا بإدخال قيم عناصر المولد مع إمكانية تغييرها متى أردنا وإظهار شكل موجة الخرج الناتجة وذلك لمولد نبضي وحيد المرحلة موجود في مخابر التوتر العالي بألمانيا، يبين الشكل (1-16) الدارة العملية لمولد نبضي وحيد المرحلة الذي تمت دراسته وهو توصيلة (B).



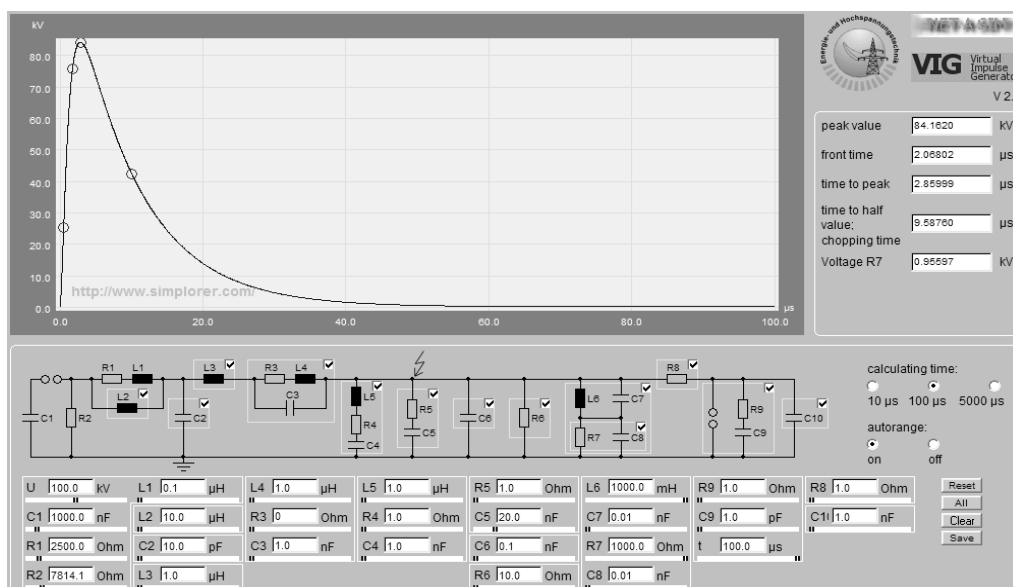
الشكل (1-16) دارة المولد العملي الموجود في مخابر التوتر العالي - ألمانيا

يبين الشكل (1-17) واجهة البرنامج المكتوب مع ملاحظة وجود نوافذ لإدخال قيم عناصر المولد أما في الجزء الأيمن من الواجهة قيم الازمنة.



الشكل (1-17) واجهة البرنامج مع شكل موجة الخرج الناتجة

يبين الشكل (1-18) واجهة البرنامج مع إمكانية ادخال عناصر التعويض التسلسلي والتفرعي وتغيير محددات المولد للحصول على موجة خرج بأزمنة مختلفة.



الشكل (1-18) واجهة البرنامج مع عناصر تعويض تفرعي وتسلسلي

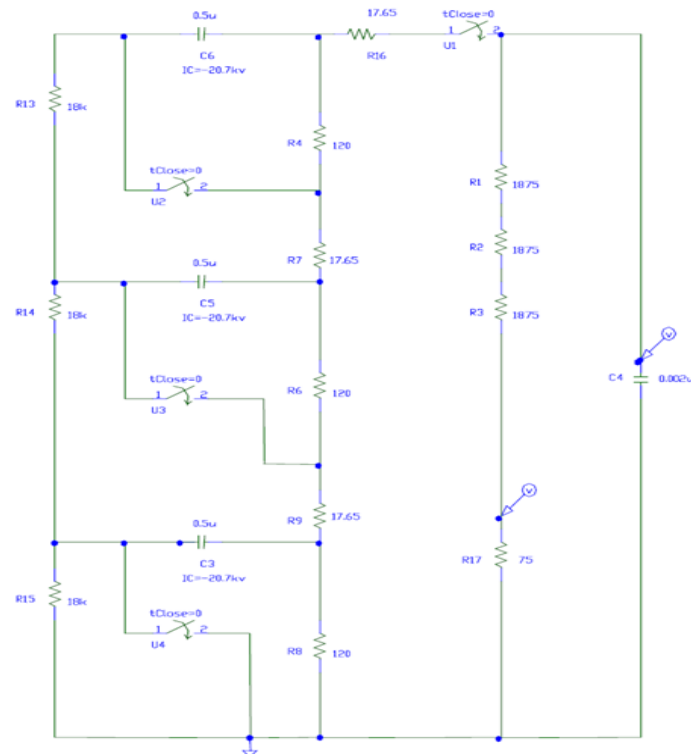
6-1: الدراسة المرجعية السادسة:

أجريت هذه الدراسة [6] في جامعة University of Pittsburgh عام 2013.

AN IMPULSE GENERATOR SIMULATION CIRCUIT نمذجة المولد النبضي

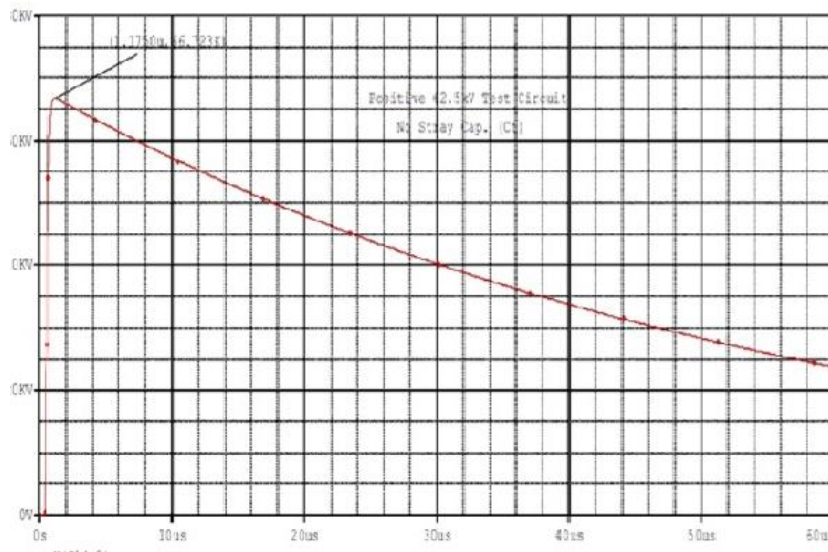
J. R. Boston H. K. Kim

لقد تم في هذه الدراسة نمذجة مولد نبضي ثلاث مراحل والحصول على شكل موجة الخرج مع إيجاد كل من زمني الجبهة ونصف الظهر وذلك مع وبدون السعة الشاردية C وتأثير ذلك على محددات الموجة النبضية مع تغيير توتر الشحن وأثره على ذلك وقد حصلنا على النتائج التالية و يمثل الشكل (1-19) دائرة ثلاث مراحل بدون السعة الشاردية.



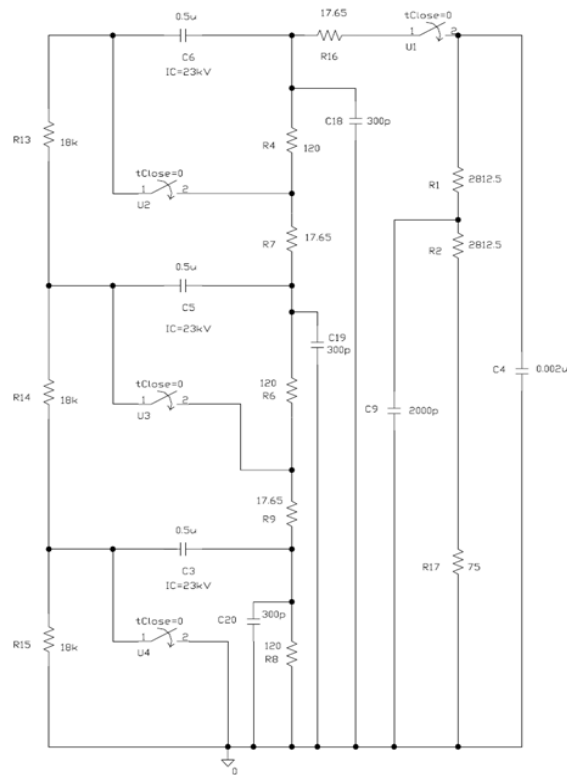
الشكل (19-1) دائرة ثلاث مراحل بدون السعة الشاردية

يمثل الشكل (20-1) موجة الخرج بدون السعة الشاردية:



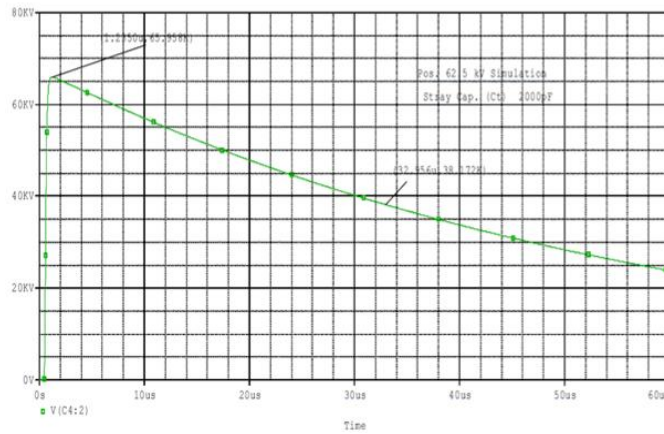
الشكل (20-1) موجة الخرج بدون السعة الشاردية

يبين الشكل (21-1) دائرة ثلاث مراحل مع السعة الشاردية.



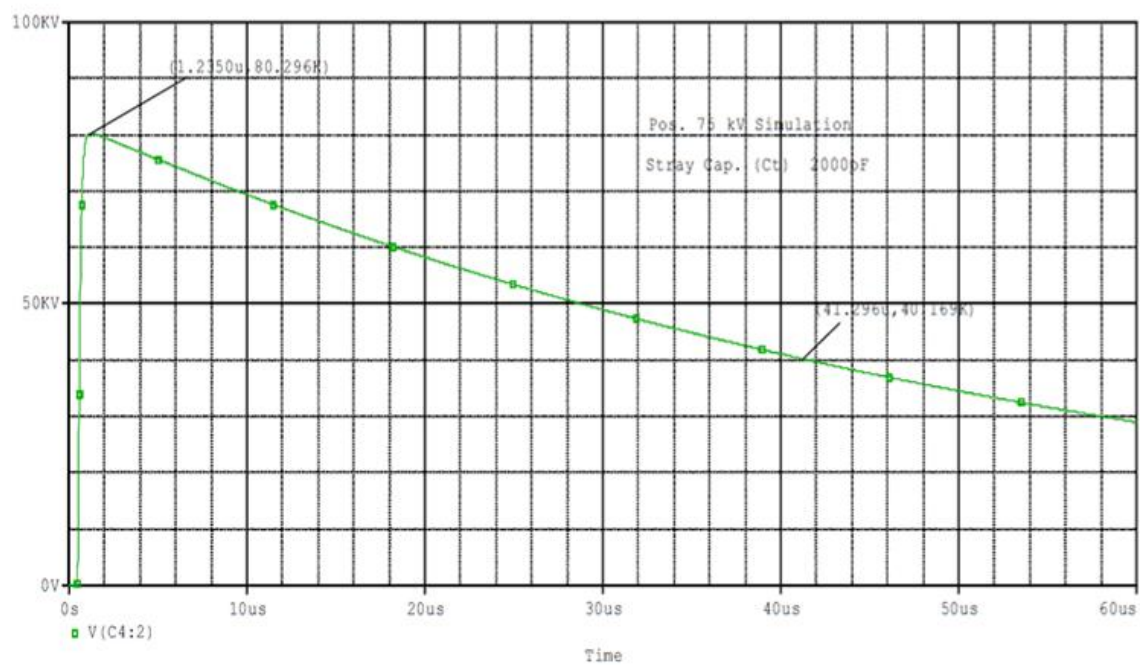
الشكل (21-1) دائرة ثلاث مراحل مع السعة الشاردية.

يمثل الشكل (22-1) موجة الخرج مع السعة الشاردية:



الشكل (22-1) موجة الخرج مع السعة الشاردية

يبين الشكل (23-1) موجة الخرج مع السعة الشاردية وتغير توتر الشحن وبالتالي تغير القيمة العظمى للتوتر الناتج.



الشكل (1-23) موجة الخرج مع السعة الشاردية وتغير توتر الشحن

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

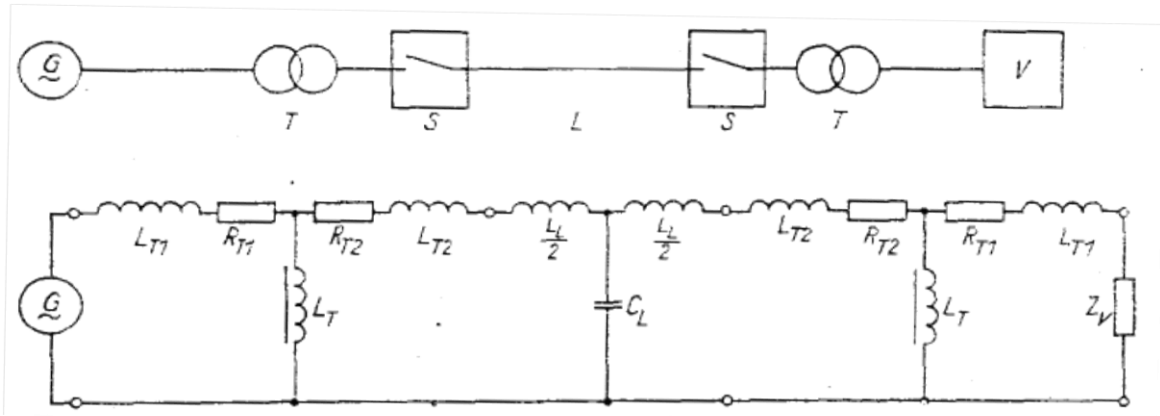
1-2: التوترات النبضية الزائدة:

إن التوترات الزائدة الناتجة عن الحالات العابرة التي تحدث في الشبكات الكهربائية نتيجة البرق أو نتيجة الفصل والوصل ثم تنتقل على طول الشبكة على شكل موجات مسافرة تؤثر في عازلية التجهيزات الكهربائية المستخدمة في هذه الشبكات. لذا لابد من توليد توترات مشابهة لهذه التوترات لمعرفة ودراسة مدى هذا التأثير.

تقسم التوترات الزائدة طبقاً لسبب نشوءها إلى توترات زائدة ذات منشأ داخلي والتي منبعها من الشبكة الكهربائية نفسها، وإلى توترات زائدة ذات منشأ خارجي لأن سبب نشوءها يعود إلى الانفراغات البرقية (الصواعق).

1-1-2: التوترات الزائدة الداخلية:

تحتوي الشبكات الكهربائية على عناصر لتخزين الطاقة الكهربائية منها العناصر المستخدمة في تخزين الحقل المغناطيسي (الملفات) [8] يبين الشكل (1-2) صورة مبسطة لنظام كهربائي.



الشكل (1-2) الدارة الكهربائية لنظام قدرة كهربائي

فعند فصل أو وصل الأحمال المربوطة إلى الشبكة بشكل طارئ (عطل) تحدث توترات زائدة عليها وبما أن هذه التوترات تأتي من الشبكة لذلك تسمى توترات زائدة داخلية وهذه الحالات العابرة تؤدي إلى حدوث اهتزازات غير دورية أو دورية متخامدة على منحنى التوتر العائد لها.

تتعلق الإجهادات الكهربائية المطبقة على المادة العازلة بمطال وشكل موجة وزمن تطبيق التوترات الزائدة، وإن قيمة التوترات الزائدة التي تحدث في نقطة ما من الشبكة تكون أكبر من أكبر قيمة لتوتر العمل الطبيعي لهذه الشبكة كما في العلاقة:

وتتميز زيادة التوتر بمعامل زيادة التوتر كمقياس للتوترات الزائدة:

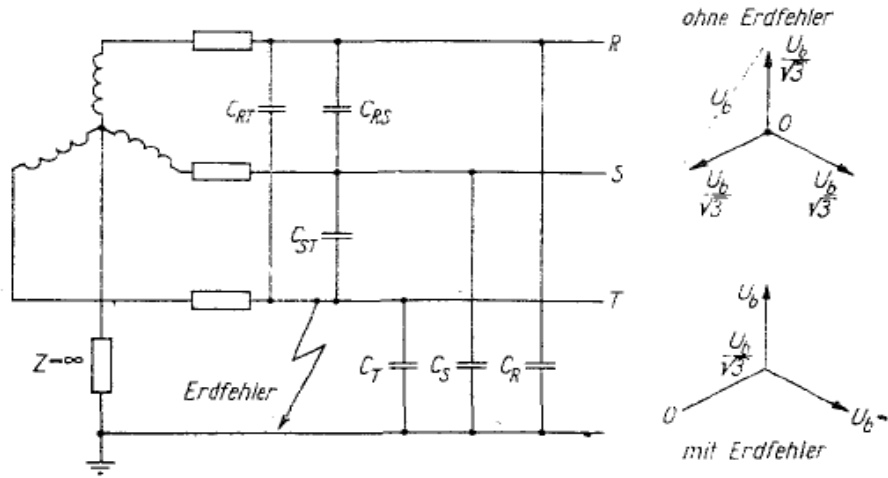
U_m : القيمة العظمى لتوتر العمل بين طور و الارض.

توجد ثلاثة أسباب رئيسية لحدوث التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي تصنف حسب ظهورها كما يلي:

- أ- فصل ووصل الأحمال بشكل مفاجئ في الحالة الطبيعية المستقرة لعمل الشبكة حيث يتم التحكم بالتوتر بواسطة منظم التوتر الذي يتحكم بتيار التحريض للمنوبات وفي هذه الحالة نضمن عدم تجاوز قيمة التوتر قيمة توتر العمل الأعظمي للشبكة ونتيجة قذف الأحمال تزداد سرعة المنوبة مما يزيد قيمة التوتر المطبق على الشبكة وتقترب قيمة التوتر في المنوبات من قيمة القوة المحركة الكهربائية الداخلية ويصل عامل زيادة التوتر الديناميكي في هذه الحالة إلى 1.2.
- ب- عند قذف حمل من نهاية خط نقل طويل تحدث توترات زائدة نتيجة تيارات التحميل السعوية ويكون التوتر في نهاية الخط U_E أكبر من التوترات في بدايته U_A وهذا ما يسمى ظاهرة فرانتي.

حيث L : طول الخط و $\beta = 0.06^\circ / Km$

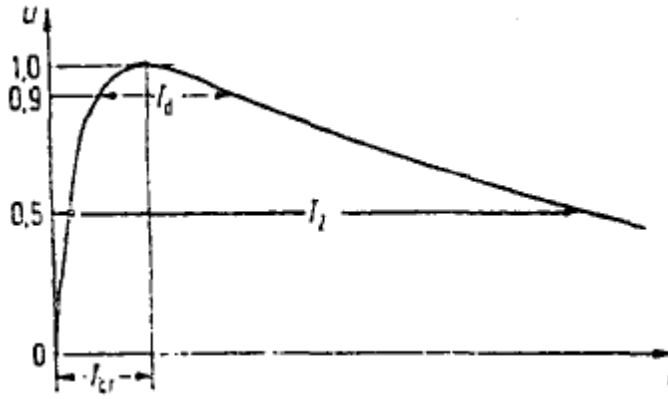
- ج- يسبب عطل طور_أرض غير المتزن (تماس احد النواقل مع الأرض) وهو يمثل أغلب الأعطال في المنشآت الكهربائية ويتعلق هذا النوع من الأعطال بطول الشبكة، لان احتمال حدوث خطأ ارضي يزيد بازدياد طول الشبكة وكمثال على ذلك نأخذ شبكة ذات نقطة نجمية معزولة الشكل (2-3).



الشكل (2-3) شبكة ذات نقطة نجمية معزولة مع قصر احد الاطوار

فعند حدوث قصر احد الأطوار مع الأرض يصبح كمون هذا الطور كمون الأرض وكمون النقطة النجمية، كمون الطور $U_b/\sqrt{3}$ وبالتالي يرتفع الكمون في الطورين السليمين بمقدار $\sqrt{3}$ مرة. إن لموجة

التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي منحنيًا زمنياً غير جيبى كما في الشكل (2-4) حيث يبلغ الزمن الجبهي له بضعة مئات من الميكروثانية ويبلغ زمن نصف الظهر بضعة آلاف الميكروثانية.



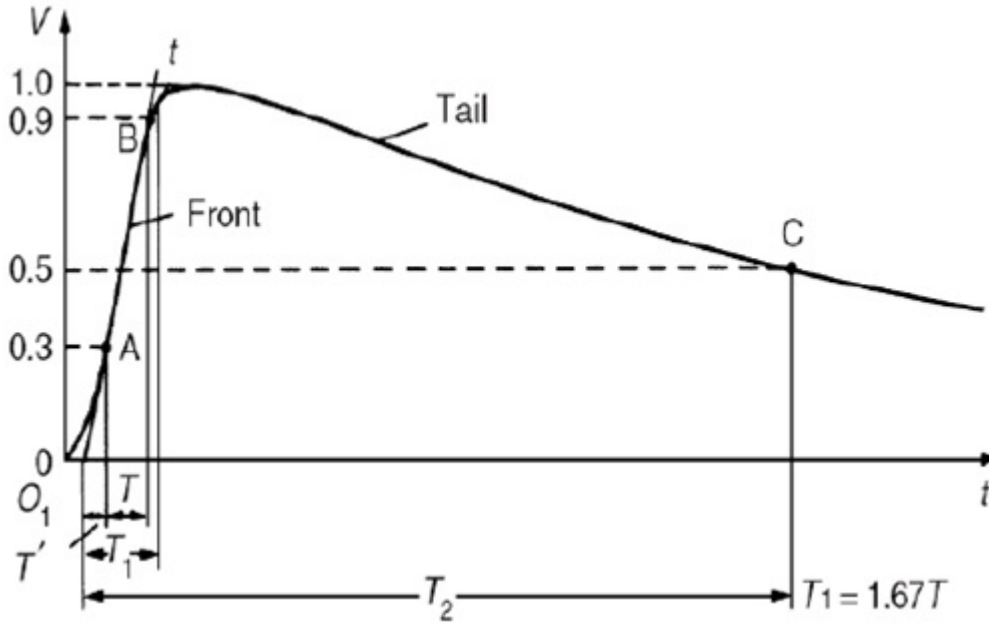
الشكل (2-4) شكل موجة التوتر الزائد التوصيلي

ونذكر من عمليات القطع التي تسبب حدوث توترات زائدة ما يلي: [10]

- (a) تشغيل خط نقل طويل على فراغ.
- (b) التشغيل الآلي بعد فصل خاطئ.
- (c) التشغيل بعد التخلص من حالة قصر متناظر أو غير متناظر.
- (d) حالة فصل حمل تحريضي (فصل محول على فراغ).

2-1-2: التوترات الزائدة الخارجية:

يقصد بها زيادة التوتر قصيرة الأمد في الشبكة والناجمة عن إصابة الشبكة إصابة مباشرة أو غير مباشرة بصاعقة، وتتصف هذه التوترات بالنبضة ذات الأمد القصير، ويبين الشكل (2-5) شكل موجة التوتر البرقية حيث يبلغ الزمن الجبهي لها 1.2 ميكروثانية ويبلغ زمن نصف الظهر حوالي $50 \mu s$.



الشكل (5-2) شكل موجة التوتر البرقية

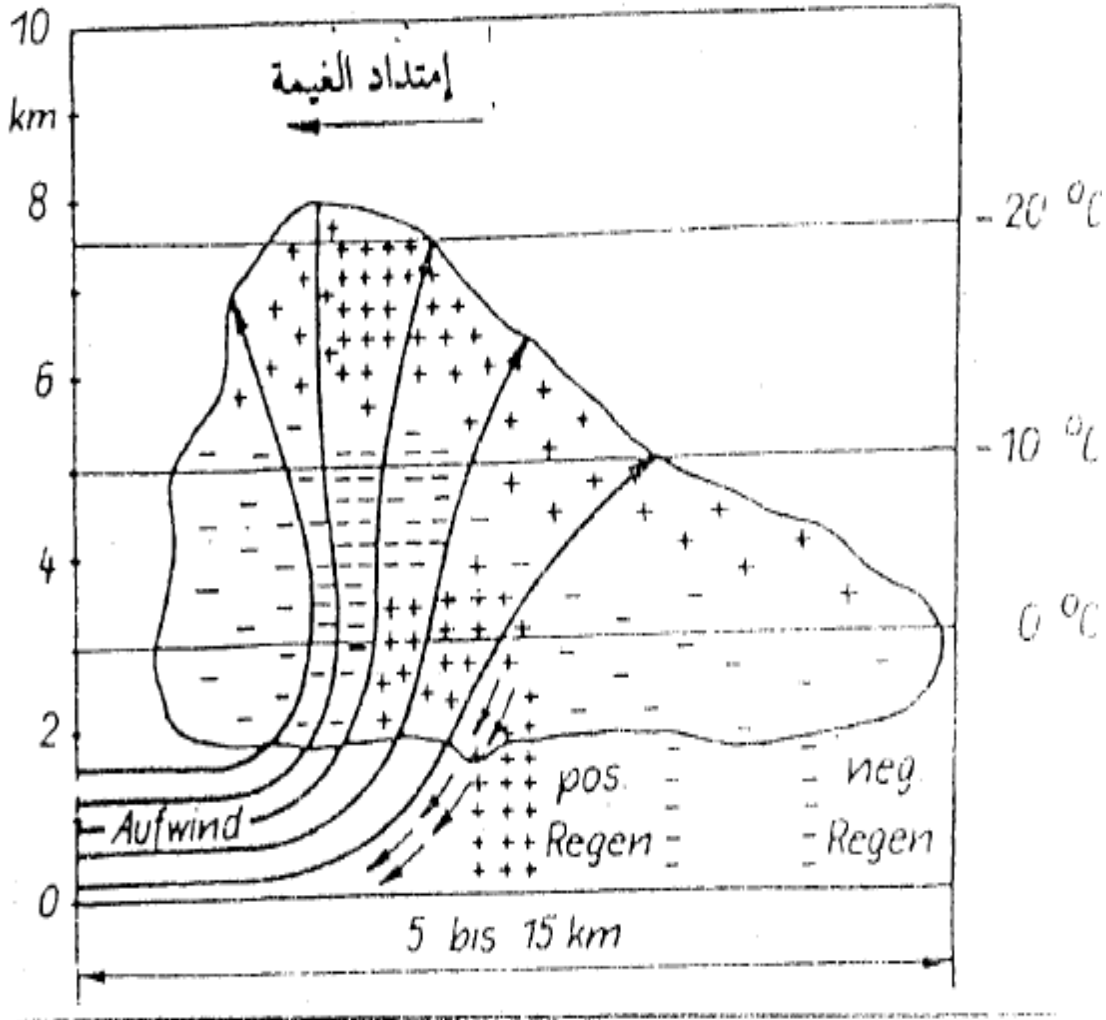
سوف نستعرض فيما يلي أسباب والية حدوث الصواعق الكهربائية وآلية تحريض توترات زائدة على الشبكة.

1-2-1-2: فيزيائية حدوث الصواعق:

تنشأ الصواعق الرعدية نتيجة الحركة السريعة للهواء الرطب شاقولياً نحو الأعلى وهذه الحركة ناتجة عن سقوط أشعة الشمس على كتلة من الهواء فترة زمنية طويلة مما يؤدي إلى تسخينها وصعودها نحو الأعلى لكنها تجبر على التوقف عن الصعود في طبقات الجو العليا حيث درجة الحرارة منخفضة [9]. ويتكاثف بخار الماء على شكل قطرات ماء أو حبات ثلج وتتشكل الغيوم وتتراكم كمية كبيرة من الشحنات الكهربائية. من المؤكد أن سبب تراكم الشحنات الكهربائية في الغيمة يعود إلى تأين قطرات الماء وحبات الثلج وانشطارها نتيجة لاحتكاكها بالرياح، ولا توجد حتى الآن نظرية تستطيع تفسير هذه الآلية بدقة فبحسب فرضية الانشطار يسود حقل كهربائي على الأرض أثناء الطقس الجيد يسمى حقل الطقس الجيد، ويعود سبب نشوئه إلى الشحنات الموجبة الموجودة في طبقات تبعد عن الأرض (100 - 150 كم) تسمى طبقات (heavyside) تتكون هذه الطبقات من أيونات موجبة تتشكل بشكل مستمر بسبب الأشعة الكونية والأشعة فوق البنفسجية الصادرة عن الشمس وأشعة غاما التي تصدر عن

الأرض، ولالأرض نفسها شحنة سالبة تقدر بـ (-4.5×10^5) كولومب، وهذا ما يساعد على تأيّن قطرات الماء فتتجمع الشحنات السالبة في أعلاها والشحنات الموجبة في أسفلها.

تنشط قطرات الماء نتيجة احتكاكها بالهواء وتحمل التيارات الهوائية الصاعدة الشحنات السالبة إلى أعلى الغيمة في حين تتجمع الشحنات الموجبة في أسفلها. تصطدم الشحنات السالبة مع حبات الثلج الساقطة مع أعلى الغيمة حيث تسود درجة حرارة منخفضة فتشحنها بشحنة سالبة وبالتالي تصبح حوامل الشحن السالبة أثقل من حوامل الشحن الموجبة، فتتبادل المواقع فيما بينها وتتوضع في أسفل الغيمة شحنات سالبة وفي أعلاها شحنات موجبة كما في الشكل (6-2).



الشكل (6-2) توزيع الشحنات الموجبة والسالبة في الغيمة

إن التوزيع السابق يساعد على زيادة تشكل الشحنات الموجبة على الأرض. ومن ناحية أخرى فقد بينت بعض الدراسات إمكانية تجمع كميات من الشحنات الموجبة في قاعدة السحابة، والتي يمكن إرجاعها إلى حمل الرياح الصاعدة لبعض الشحنات الموجبة الناتجة عن انفراغات الكورونا الموجبة بسبب شدة الحقل الكهربائي الموضعية العالية لعدد من المواقع البارزة على سطح الأرض.

مما سبق نتبين انه يمكن عد سحابة الصواعق من الناحية الكهربائية مولداً كهربائياً ساكناً هائلاً، فتقوم قطرات الماء وجزيئات الثلج فيه بدور حاملات الشحنة وتقوم الرياح بدور وسيلة نقل الشحنات، بينما تمثل الشمس مصدر الطاقة اللازمة لتسخين طبقات الهواء وإشباعه بالرطوبة.

يزداد تراكم الشحنات داخل السحابة مع استمرار العمليات السابقة. كما أن شدة الحقل الموضعية بين قطرات الماء والهواء المحيط تزداد بصورة كبيرة جداً مما يتسبب في نشوء شذات حقل عالية ضمن السحابة، أو بين السحب أو بين السحابة والأرض تتجاوز قيمتها المتانة الكهربائية للهواء، مما يؤدي بالتالي إلى بدء عمليات الانفراغ البرقي بين السحب أو بين السحابة والأرض.

هذا ما أدى إلى الاعتقاد بأنها ناشئة عن تيار هوائي قوي ينفخ القناة المؤينة من داخل السحابة. حيث تحصل الانفراغات الهوائية جانبياً فتصل أحياناً إلى مسافة عدة كيلومترات في ظروف رياح مؤاتية. وأحياناً تعود هذه الانفراغات لتدخل في قاعدة سحابة أخرى تدعى بالانفراغات سحابة-سحابة، والتي يكون احتمال حدوثها اكبر بكثير من حدوث انفراغات سحابة مع الأرض بنسبة قد تتجاوز 6 إلى 1.

2-2-1-2: مراحل نمو الانفراغ البرقي:

يمكن تلخيص مراحل نمو الانفراغ البرقي بين السحابة والأرض على الشكل التالي:

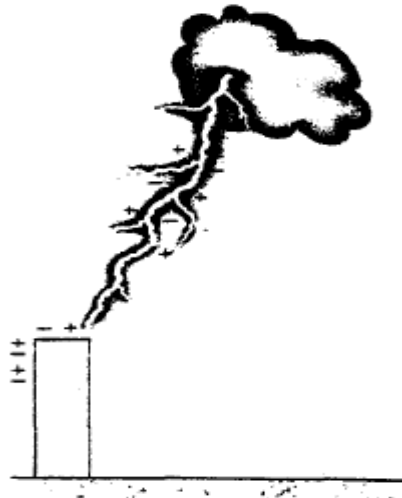
يبدأ نشوء انفراغات الصواعق التي تحدث بين السحابة والأرض والتي تشكل في النهاية وصلة ناقلة بين نقطتين نتيجة لازدياد شدة الحقل السائدة في منطقة ما من السحابة إلى قيم اكبر من المتانة الكهربائية للهواء، ولا تنشأ قناة البلازما التي تصل بين السحابة والأرض بشكل فوري ومفاجئ وإنما على مراحل وكل مرحلة من هذه المراحل تتلو سابقتها بسرعة كبيرة. كما أن طول كل من هذه المراحل أو الخطوات يتراوح بين 10 و 100 متر، ويتراوح الزمن الذي يفصل بين مرحلتين ويسمى زمن الاستراحة بين $(30 - 90\mu s)$. ان المرحلة الاولى للانفراغ البرقي هي مرحلة تطور وتدرج

انفراغات الليدر التي تنطلق من السحابة وتتحرك باتجاه الأرض، ولا يمكن متابعة تطورها بالعين المجردة. وعندما تقترب انفراغات الليدر من الأرض فإن شحناتها السالبة الضخمة نسبياً تحرض كمية ضخمة مساوية لها من الشحنات الموجبة على الأرض وتحت السحابة، وخاصة على الأجسام البارزة فوق سطح الأرض.

هكذا تتجاذب الشحنات المتعاكسة القطبية مع بعضها حيث تحاول الشحنات الموجبة المتحرضة أن تتحد مع مراحل الليدر المتحركة للأسفل لينمو تيار الستريمير المتحرك والصاعد للأعلى فيلنقيان ويشكلان وصلة عالية الناقلية لتيار كبير جداً. ولينكون من بعد ذلك انهيار برقي ذو لمعان ضوئي شديد وتبين الأشكال (7-2) و (8-2) مراحل تطور ونمو الانفراغ البرقي.



الشكل (7-2) مراحل تطور الانفراغ البرقي



الشكل (8-2) حدوث الصاعقة

عندما تصل الخطوة الأخيرة من الليدر النازل إلى سطح الأرض تنشأ شرارة جديدة تنطلق من الأرض باتجاه السحابة سالكة الطريق الذي كانت الخطوات السابقة قد مهدته، وبذلك يحصل الانفراغ الرئيسي وترتفع قيمة التيار خلال فترة زمنية قصيرة جداً إلى قيم هائلة جداً. كما أن قناة البلازما تضيء عندها بشكل قوي ويستطيع الإنسان رؤية شرارة الانفراغ بالعين المجردة.

3-2-1-2: القيم المميزة للصاعقة:

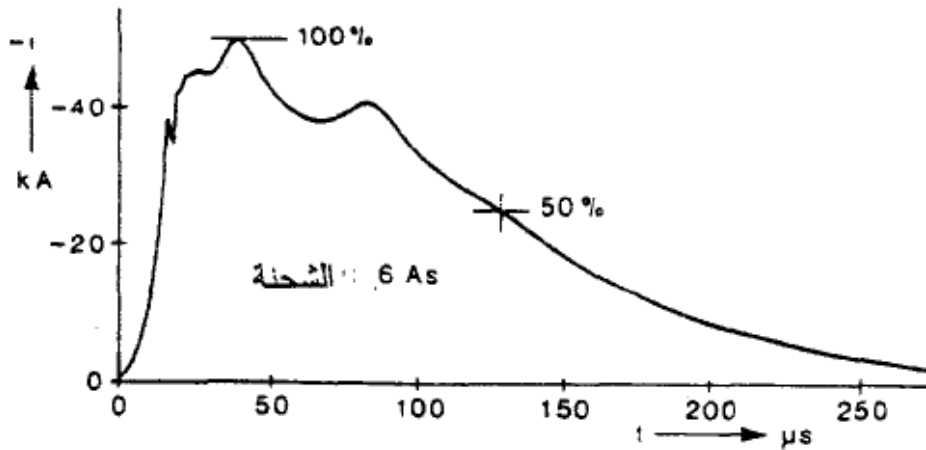
لتوليد التوتر العالي النبضي البرقي حسب المواصفات القياسية العالمية، لابد في البداية من معرفة مجموعة من المحددات المميزة للصاعقة. ونظراً لأن قيم هذه المحددات ذات طبيعة احتمالية، فإنه يتم اعتماد القيم الإحصائية لهذه المحددات. ومن أهم هذه المحددات المميزة للصواعق:

i. المسار الزمني لتيار الصاعقة $i = f(t)$.

ii. التزايد الاعظمي لتيار الصاعقة الزمني $(\frac{di}{dt})_{\max}$.

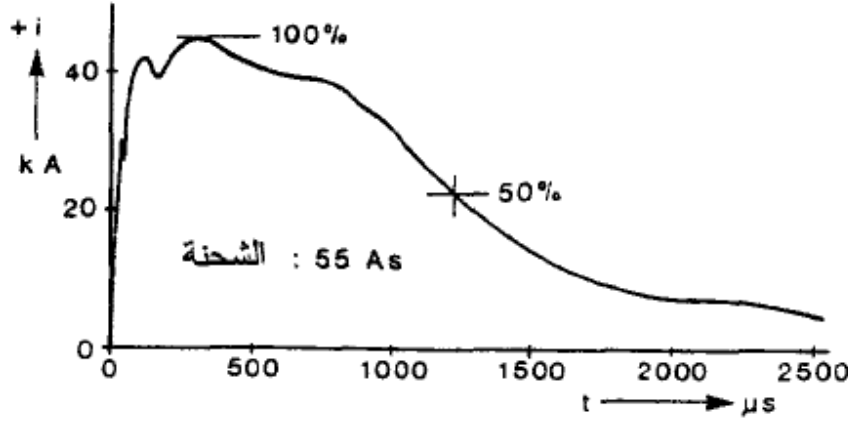
iii. الزمن الجبهي وزمن نصف الظهر.

تبين الدراسات أن المسار الزمني لتيار الصاعقة بين السحب والأرض يمكن أن يأخذ أشكال مختلفة. ففي حال انفراغ صاعقة سالبة بين سحابة والأرض مثلاً فإن التيار يتصاعد بشكل كبير ويبلغ قيمته الاسمية البالغة بضعة عشرات من الكيلو أمبير خلال بضعة عشرات من الميكروثانية، ويبدأ بعد ذلك بالتناقص وتبلغ شحنة الموجة بضعة أمبير ثانية كما في الشكل (9-2).



الشكل (9-2) المسار الزمني لتيار صاعقة سالبة

أما في الحالة **انفراغ موجب بين السحابة والأرض**، إن أزمنة نبضات تيار الانفراغ الموجبة تكون أكبر بحوالي 10 مرات من أزمنة نبضات التيار السالبة، وبالتالي نحصل على شحنات أكبر منها في حالة الانفراغات السالبة. كما في الشكل (10-2).



الشكل (10-2) المسار الزمني لتيار صاعقة موجب

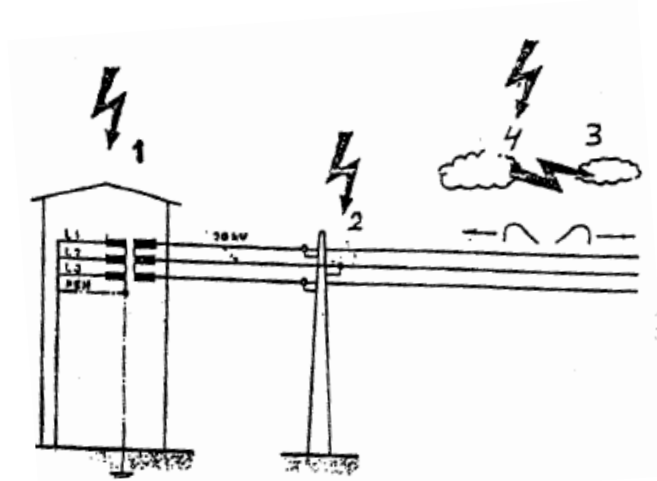
إن معرفة القيمة العظمى لتغير تيار الصاعقة خلال الزمن الجبهي $(\frac{di}{dt})_{\max}$ لنبضة التيار ضرورية من أجل حساب قيمة التوترات التي تسببها الحقول الكهروستاتيكية الناتجة عن تيار الصاعقة في الاجسام والتجهيزات الموجودة قرب مكان سريان تيار الصاعقة.

حيث: $\frac{di}{dt}$: تغير تيار الصاعقة بالنسبة للزمن [kA/ μs]

4-2-1-2: أثر الصواعق على شبكات نقل القدرة:

أ- أثر زيادة توتر الخط نتيجة الإصابة المباشرة بالصواعق:

تتعرض خطوط نقل وتوزيع القدرة الكهربائية بحكم امتدادها وارتفاع تعليق نواقلها إلى الإصابة بالانفراغات البرقية، حيث تسبب هذه الانفراغات تحريض توترات زائدة في هذه الشبكات تنتقل على شكل موجات مسافرة على الخطوط حتى تصل إلى المحطة فتسبب تلف بعض التجهيزات فيها. ويمكن للصواعق أن تصيب المحطة إصابة مباشرة بصاعقة (1) وهذا الاحتمال صغير. وأن تصيب احد الخطوط الهوائية إصابة مباشرة (2) مما يؤدي إلى نشوء توتر كبير جداً على هذه الخطوط كما في الشكل (11-2).

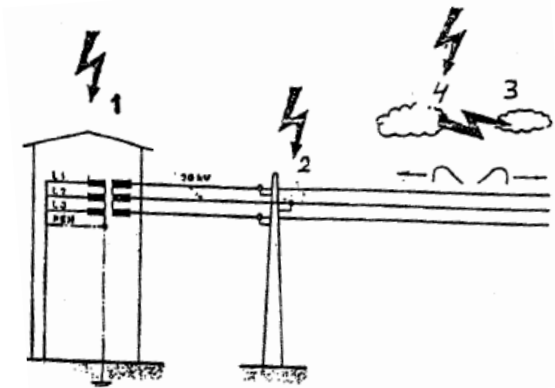


الشكل (11-2) مكان الاصابة المباشرة بالصاعقة

تتعلق زيادة التوتر بشكل أساسي بممانعة الخط الكلية (الممانعة الموجبة ZW + مقاومة الخط R_L). إن مقاومة الخط R_L صغيرة إذا ما قورنت بالممانعة الموجبة ZW (تساوي تقريباً 500Ω). ينتشر هذا الارتفاع المفاجئ في التوتر على شكل موجة مسافرة على طرفي الناقل، ويؤدي ذلك بطبيعة الحال إلى انهيار العوازل أو إصابة الأجزاء الحساسة غير المحمية في المحطات.

ب- أثر زيادة توتر الخط نتيجة الإصابة غير المباشرة:

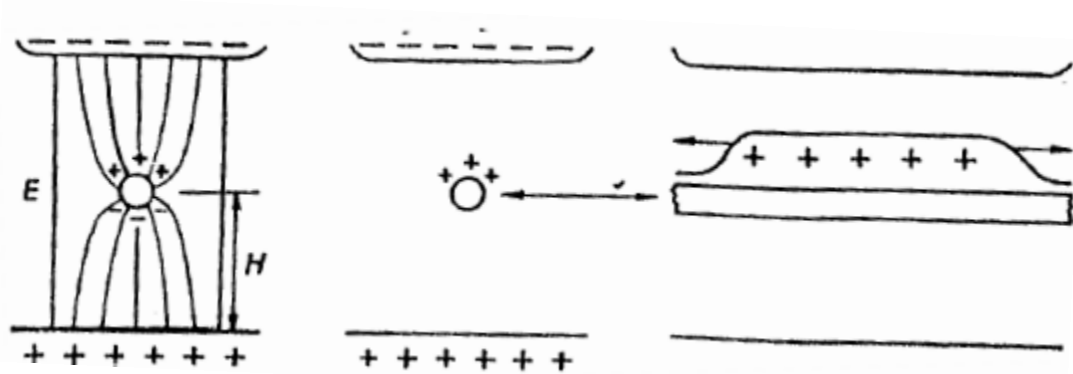
عند حدوث انفراغ برقي بين سحابتين (3) كما في الشكل (12-2).



الشكل (12-2) مكان الاصابة غير المباشرة بالصاعقة

تتعرض في الشبكة توترات زائدة. فعند اقتراب سحابة ذات شحنة معينة ولتكن سالبة من ناقل هوائي، فإن الحقل الناتج بين السحابة والأرض سوف يؤثر على الناقل عن طريق الشحن بالتأثير، ويؤدي إلى

فصل الشحنات الكهربائية كما هو مبين في الشكل (2-13). يمكن أن تتفرغ (الشحنات السالبة) إلى الأرض عبر عوازل التعليق والبرج وذلك بسبب سوء العازلية مثلاً. وبالتالي فإن الناقل يبقى مشحوناً بالشحنات الموجبة، وإذا حدث انفراغ برقي مع غيمة أخرى أو مع الأرض، فإن شحنات السحابة المؤثرة سوف تتعدل خلال فترة قصيرة جداً (من مرتبة الميكروثانية)، فتحرر الشحنات الموجودة على الناقل لأنها لم تعد مقيدة بحقل السحابة، وبالتالي فإن هذه الشحنات سوف تنتقل على طرفي الناقل على شكل موجات مسافرة. وتكون قطبية التوتر المتحرض دائماً بعكس التيار البرقي وقيمة التوتر المتحرض تكون غير خطرة على عازلية التجهيزات في المحطة.



الشكل (2-13) عملية فصل الشحنات الكهربائية

لكن أغلب التوترات الزائدة المتحرضة بالشبكة والتي تشكل خطراً على عازلية التجهيزات الكهربائية يسببها سقوط الصاعقة بالقرب من هذه الشبكة، يتعلق مطال هذه التوترات بميل موجة التيار البرقي وارتفاع أبراج التعليق وبعد نقطة الإصابة عن الشبكة وتعطى قيمة هذه التوترات بالعلاقة:

h : ارتفاع ناقل الشبكة عن الأرض بـ m .

K : ثابت ويساوي 1.2

I_0 : تيار الصاعقة بـ kA .

X : بعد نقطة الإصابة عن الشبكة.

فمثلاً تبلغ قيمة التوتر المتحرض في شبكة كهربائية ارتفاع التعليق لنواقلها $10m$ من اجل انفراغ برقي شدة تياره $50kA$ عند سقوط الصاعقة على مسافة $100m$ القيمة:

وباعتبار أن عوازل الخط يجب أن تتحمل توتراً نبضياً قيمته خمسة أضعاف التوتر الاسمي للشبكة، لذلك تكون هذه التوترات المتحرضة في الشبكة عند سقوط الصاعقة بالقرب منها خطرة جداً في الشبكات التي تعمل على توتر أقل من 24kV وأكثر.

2-1-2-5: أزمنة الموجات النبضية:

على الرغم من الطبيعة الاحتمالية لتيار الصاعقة، فإنه توجد عدة قيم معتمدة حسب النظم العالمية EC لشكل نبضة التيار. وتتراوح قيمة الزمن الجبهي T_s للنبضات المعتمدة بين $(1-10\mu s)$ وزمن نصف الظهر Tr بين $(10-200\mu s)$.

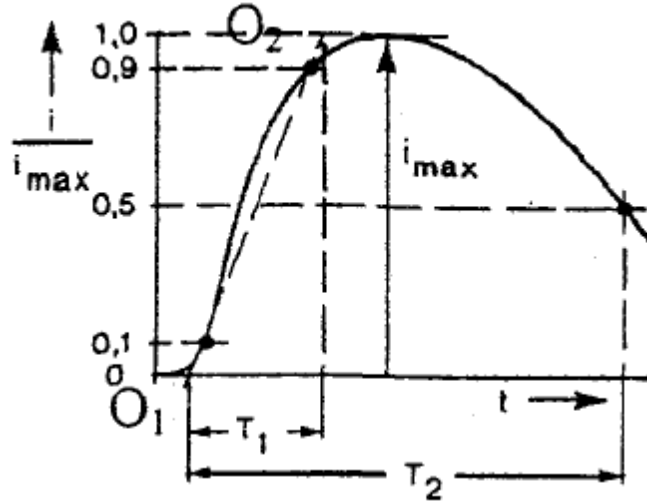
يتم تحديد الزمن الجبهي T_s برسم مستقيم يمر من النقطتين $\frac{i}{I} = 0.1$ و $\frac{i}{I} = 0.9$ ويتقاطع مع محور الزمن في النقطة $O1$ (نقطة بدء القياس)، ومع المستقيم الموازي لمحور الزمن والمار من القيمة العظمى للتيار في النقطة $O2$ وتكون الفترة الزمنية بين $O1$ و $O2$ على محور الزمن هي الزمن الجبهي.

أما زمن نصف الذيل Tr فيتم تحديده برسم مستقيم عند النقطة 50% $\frac{i}{I_{max}}$ يقطع ذيل الموجة في نقطة C الفترة الزمنية المحصورة بين نقطة بدء القياس ومسقط النقطة C على محور الزمن هي الزمن Tr وتعطي الأنظمة العالمية عدة قيم لـ T_s و Tr وأهم هذه القيم لنبضات تيار نبضي برقي:

$$\frac{T_s}{Tr} = \frac{4}{10} \mu s$$
 ويرمز لها اختصاراً

$$\frac{T_s}{Tr} = \frac{8}{20} \mu s$$
 ويرمز لها اختصاراً

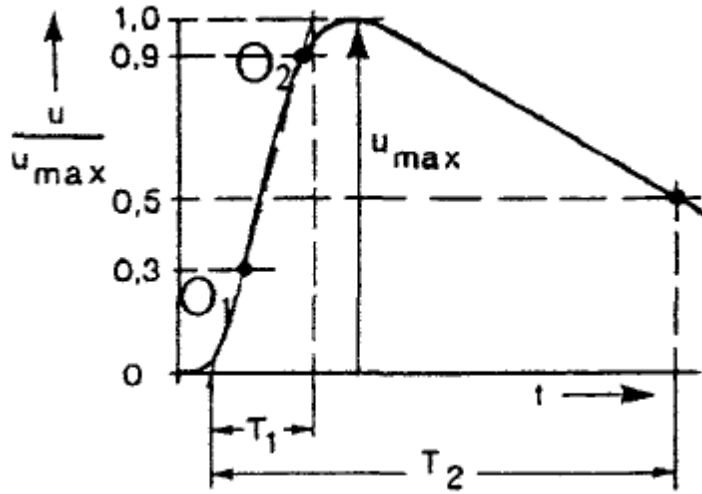
أما النبضة المعتمدة عند تصميم نظام الحماية من الصواعق فهي من الشكل $\frac{T_s}{T_r} = \frac{10}{350} \mu s$ للنبضة الأولى و $\frac{T_s}{T_r} = \frac{0.25}{10} \mu s$ للنبضة اللاحقة. ويبين الشكل (14-2) شكل الموجة النبضية مبينا عليها الزمنين T_r و T_s .



الشكل (14-2) الموجة النبضية

أما بالنسبة لنبضة التوتر البرقي فتأخذ أيضاً عدة أشكال، لكن الشكل المعتمد عالمياً هو $\frac{1.2}{50} \mu s$. ويختلف تحديد الزمن الجبهي لنبضة التوتر عن نبضة التيار كما يلي:

نرسم مستقيم يمر من النقطتين $\frac{U}{U_0} = 0.3$ و $\frac{U}{U_0} = 0.9$ فيتقاطع مع محور الزمن في النقطة $O1$ هي نقطة بدء القياس ومع المستقيم الموازي لمحور الزمن والمار من القيمة العظمى للتوتر في النقطة $O2$ ، الفترة الزمنية المحصورة بين $O1$ و $O2$ هي الزمن الجبهي. أما زمن نصف الذيل فيتم تحديده كما هو الحال عند تحديد زمن نصف الذيل لموجة التيار برسم مستقيم عند النقطة $\frac{U}{U_0} = 50\%$ يقطع الذيل في نقطة. الفترة الزمنية المحصورة بين نقطة بدء القياس ومسقط هذه النقطة على محور الزمن هو T_r . ويبين الشكل (15-2) شكل موجة التوتر النبضية البرقية مبينا عليها حساب كل من T_r و T_s .



الشكل (2-15) موجة البرق النظامية

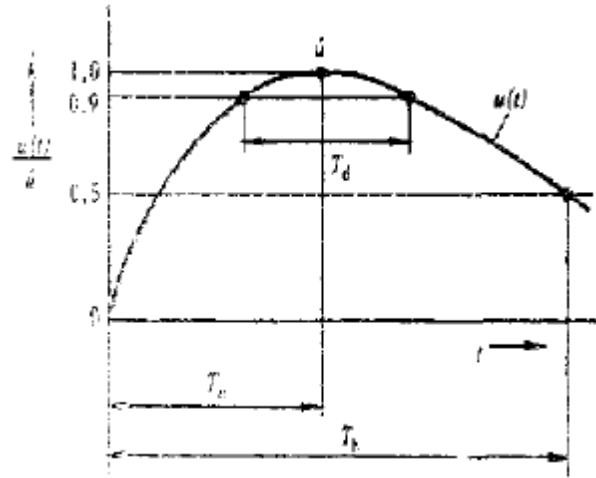
2-2: توليد التوترات العالية النبضية:

إن التوترات الزائدة الناتجة عن الحوادث العابرة التي تحدث في الشبكات الكهربائية نتيجة البرق أو نتيجة التوترات المرتفعة الداخلية (فصل وصل) تنتقل على طول الشبكة على شكل موجات مسافرة تؤثر في عازلية التجهيزات الكهربائية المستخدمة في هذه الشبكات. لذا لابد من توليد توترات مشابهة لهذه التوترات في مخبر التوتر العالي لمعرفة ودراسة مدى هذا التأثير [10].

1-2-2: التوترات النبضية فصل وصل:

إن التوترات النبضية فصل وصل أبداً بكثير في تغيراتها بدلالة الزمن من توترات البرق النبضية، أما الغاية من توليدها هي دراسة تأثير الحالات العابرة التي تحدث نتيجة فصل ووصل الأحمال أو القصر على الشبكة.

يبين الشكل (2-16) المنحني الزمني لموجة التوتر النبضي فصل-وصل، ويتم تحديد الزمن الجبهي وزمن نصف الظهر لموجة التوتر كما يلي:



الشكل (16-2) المنحني الزمني لموجة التوتر فصل وصل

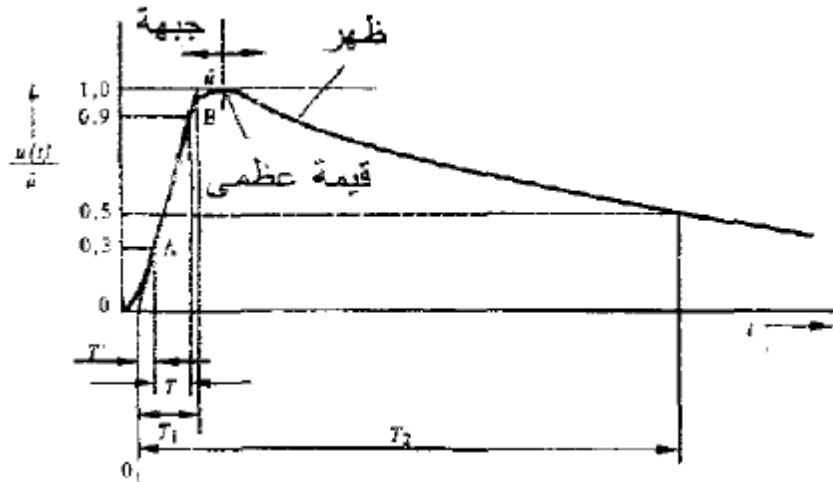
ان القيم المعتمدة من قبل IEC لكل من T_r و T_s هي:

$$T_r = 2500\mu s \pm 60\% , T_s = 250\mu s \pm 20\%$$

ويرمز لها اختصاراً بـ $250/2500\mu s$

2-2-2: التوترات النبضية البرقية:

يرتفع فيها التوتر من الصفر إلى قيمته العظمى خلال صغير جداً زمن قدره $2\mu s$ تقريباً، كما في الشكل (17-2) و الغاية من توليدها هو دراسة تأثير التوترات البرقية على تجهيزات التوتر العالي.



الشكل (17-2) المنحني الزمني لموجة التوتر النبضي البرقي

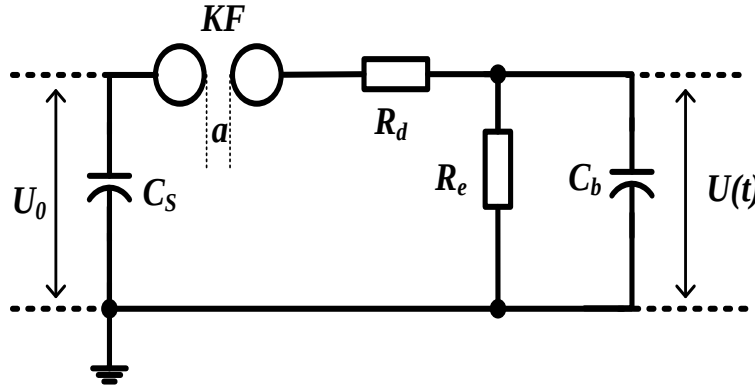
يرمز لهذه النبضة اختصاراً بـ $1.2/50\mu s$ ، ان الغاية من التآرجح هو تسهيل اجراء الاختبارات التي تؤثر خلالها المواصفات الكهربائية للجهاز المختبر (سعة أو تحريضية) على شكل النبضة. هذا فضلاً عن تحديد مجاله لكي لا يسمح بتساهل كبير في شروط التجربة.

2-3: مولدات التوتر العالي النبضي:

للحصول على توترات عالية نبضية حتى بضعة مئات الكيلو فولت، نستخدم مولد توتر نبضي يسمى مولد نبضي وحيد المرحلة. وعندما نريد الحصول على توترات عالية جداً في مجال MV نستخدم مولداً يتكون من عدة مراحل موصولة على التسلسل يسمى مولد ماركس.

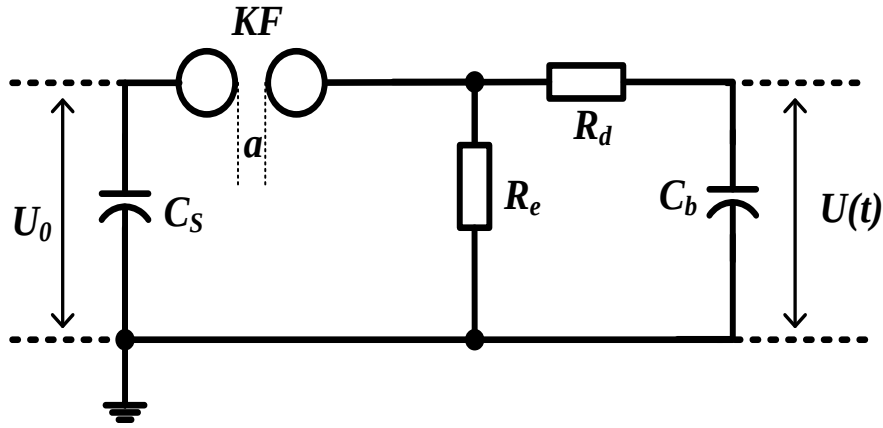
2-3-1: مولد التوتر النبضي وحيد المرحلة:

للحصول على توتر نبضي حتى بضعة مئات الكيلو فولت نستخدم إحدى التوصيلتين A أو B المبينتين في الشكل (18-2) و (19-2). حيث يبين الشكل (18-2) دائرة المولد النبضي توصيلة A.



الشكل (18-2) دائرة المولد النبضي توصيلة A

يبين الشكل (19-2) دائرة المولد النبضي توصيلة B ، وتختلف التوصيلتان عن بعضهما البعض بأن مقاومة التفريغ R_e هي قبل مقاومة الشحن في التوصيلة B وبعدها في التوصيلة A.



الشكل (2-19) دائرة المولد النبضي توصيلة B

حيث تتألف الدارة من:

U_0 : توتر الشحن المستمر والذي نحصل عليه من دائرة شحن مؤلفة من محولة توتر عالي T ومن عنصر

تقويم D ومن مقاومة شحن R_i . كما في الشكل (2-20)

C_s : سعة الشحن.

R_d : مقاومة الإخماد (الشحن).

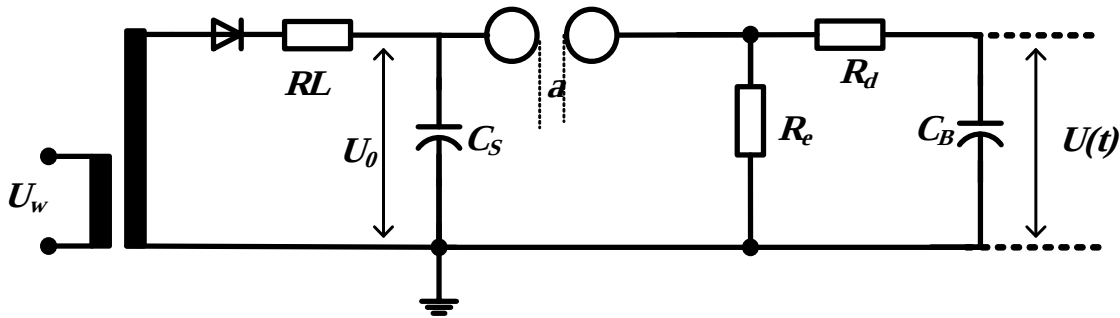
R_e : مقاومة التفريغ.

C_b : سعة التحميل وهي تمثل حملاً للمولد النبضي.

Kf: ثغرة الكرات (البعد a بين الكرتين متغير)، وكثيراً ما تدعى ثغرة الإشعال.

$U(t)$: التوتر النبضي كتابع للزمن.

ويبين الشكل (2-20) دائرة مولد توتر عالي نبضي وحيد المرحلة بشكل كامل.



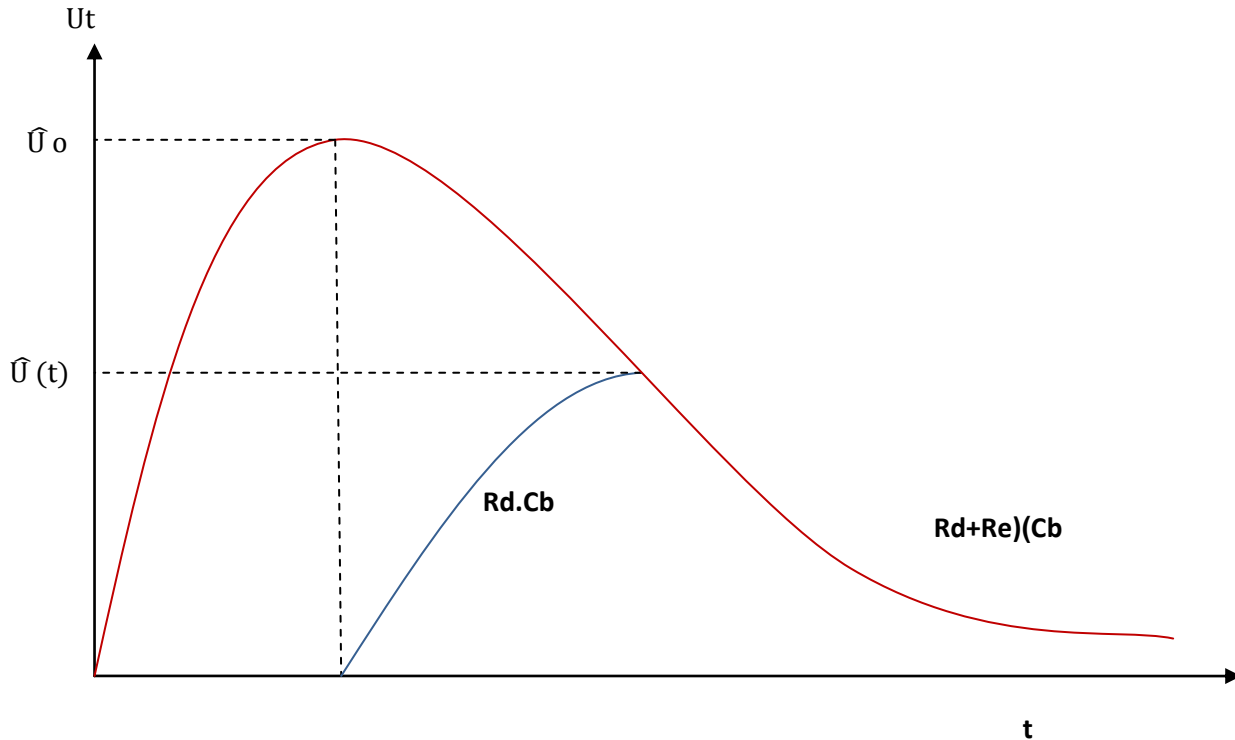
الشكل (2-20) دائرة مولد توتر عالي نبضي وحيد المرحلة بشكل كامل

إن الوظيفة الأساسية للشجرة (Kf) هي وظيفة قاطع مثالي حساس بالنسبة للتوتر. فإذا ما ارتفعت قيمة التوتر (U_0) على الكرات إلى قيمة كافية، اشتعلت الشرارة بين الكرتين وحدث الانهيار خلال زمن لا يزيد عن 10^{-8} ثانية. ويمكن التعبير عن مقدرة جودة مولد التوتر النبضي بقيمة مميزة هامة هي القدرة

$$W = \frac{1}{2} C_s (U_0)_{max}^2$$

التي يمكن تخزينها في المكثف:

يشحن المكثف C_s بتوتر مستمر يساوي توتر انهيار الشجرة وهو U_0 عندها تنهار الشجرة فتفرغ C_s شحنتها عبر مقاومة الشحن للمكثف C_b التي تبدأ بالشحن. عندما تصل قيمة التوتر $U(t)$ إلى قيمة مساوية لقيمة التوتر على المكثف C_s يبدأ C_b بالتفريغ عبر ($R_e + R_d$) وهذا ما يحدث بنفس الوقت مع المكثف C_s حيث يفرغ شحنته عبر R_e إلى الأرض كما هو مبين بالشكل (21-2).

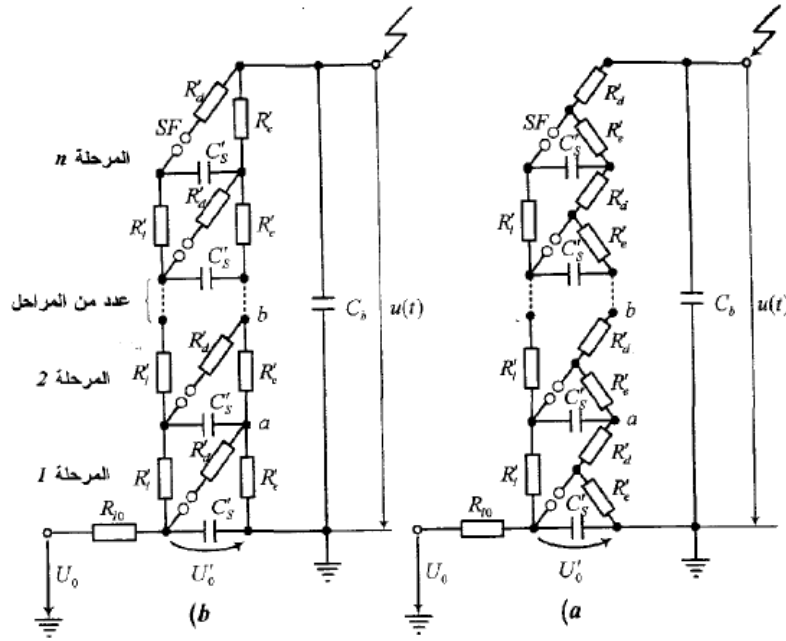


الشكل (21-2) المنحني الزمني للحصول على التوتر النبضي

بالتالي نحصل على الموجة النبضية، ونستطيع الحصول على القيم المطلوبة لزمن المقدمة وزمن نصف الظهر من خلال تغير المقاومات R_d, R_e على مولد النبضات، وتتعلق قيمة التوتر الذي نستطيع الحصول عليه بالمسافة الفاصلة بين الكرتين. والتوتر العالي النبضي الناتج هو عبارة عن شحن وتفريغ سعة الحمل C_b .

2-3-2: مولدات التوتر العالي النبضية متعددة المراحل (مولد ماركس):

لا يستخدم المولد وحيد المرحلة من اجل توليد توترات أكبر من $(250-350)KV$ بسبب الصعوبات التي تعترض الحصول على توترات شحن مرتفعة، والحل الاقتصادي الأمثل في هذه الحالة هو استخدام مولد متعدد المراحل (مولد ماركس) يبنى استناداً إلى التوصيلة A أو التوصيلة B ويعرف هذا المولد بمولد ماركس كما في الشكل (22-2).



الشكل (22-2) مولد ماركس متعدد المراحل التوصيلة B و التوصيلة A

في الحياة العملية تستعمل كلا التوصيلتين A و B على الرغم من أن مردود التوصيلة B أكبر من مردود التوصيلة A ، لكن حلاً تصميمية لتوضع العناصر الأولية يلعب الدور الأساسي في اختيار التوصيل المناسب، ويتلخص مبدأ عمل المولد متعدد المراحل كما يلي:

ت شحن المكثفات C'_s على التوازي حتى قيمة تساوي توتر انهيار الثغرة عندها تنهار الثغرات وتبدأ C'_s بالتفريغ على التسلسل وذلك عبر R'_d لت شحن C'_b على التسلسل أيضاً ثم تفرغ بعدها C'_b عبر $(R'_d + R'_e)$ التوصيلة B وعبر (R'_e) التوصيلة A إلى الأرض لنحصل على موجة التوتر المطلوبة ويكون التوتر النبضي الناتج هو $U = .n. U_0$

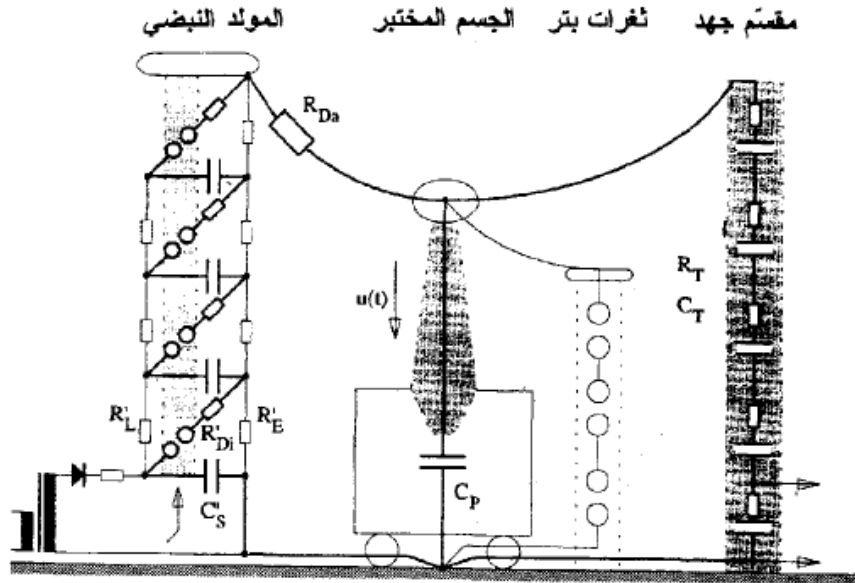
حيث n : عدد مراحل المولد

η : المردود وذلك حسب نوع التوصيلة

U_0 : توتر الشحن المستمر.

تبنى الثغرات الكروية في المولد بحيث تنهار الثغرة الأولى أولاً (بجعل البعد بين كرتي الثغرة الأولى أقل بقليل من البعد بين كرتي الثغرات للمراحل التالية)، وبالتالي يتم انهيار هذه الثغرة أولاً ومن ثم تنهار باقي الثغرات. أن زمن انهيار الثغرة الهوائية يتم خلال زمن لا يزيد عن 10^{-8} ثانية. وعندما يكون المولد متناظراً فإن قيم العناصر C'_s, R'_d, R'_e تكون متساوية في جميع المراحل، وتحسب عناصر المولد وحيد المرحلة على ما يلي:

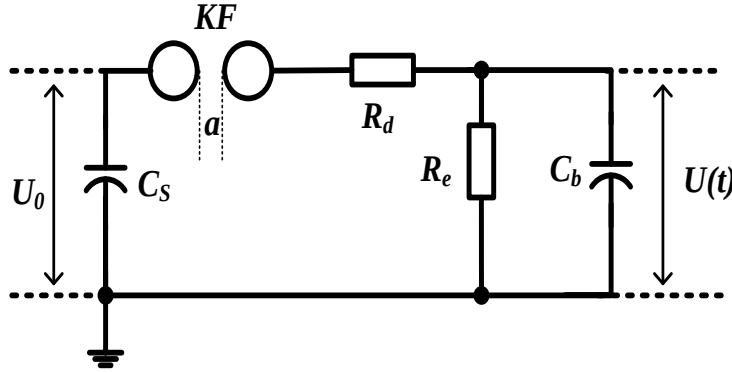
يبين الشكل (23-2) دارة الاختبار لجهاز ما بتطبيق توتر نبضي عليه حيث يتم وصل قطب التوتر العالي للمولد النبضي إلى الجهاز المختبر بواسطة مقاومة إخماد R_{Da} ومن الجهاز المختبر إلى مقسم جهد، ومن ثم إلى دارة القياس.



الشكل (23-2) دارة الاختبار بمولد ماركس

2-3-3: حساب توصيلات مولدات التوتر النبضي:

إن الحسابات الرياضية لتوصيلات المولد النبضي أمر صعب في غالب الأحيان لكنه ممكن في حالة التوصيلتين (A) و (B) [7] [11] وسنعرض الحساب الرياضي بالنسبة للتوصيلة (A) كما في الشكل (2-24) يمكن اعتبار مكثف الصدم C_s على أنه منبع للتوتر قوته المحركة الكهربائية e_s تعطى كما يلي: $e_s = -u_s$



الشكل (2-24) دائرة المولد النبضي توصيلة (A)

و حسب كيرشوف

يمكن كتابة المعادلتين التاليتين:

(1)

$$-U_s = U_d + U_B$$

(2)

$$i = i_1 + i_2$$

وبتعويض قيم التيارات في المعادلة (2) نحصل على:

(3)

$$C_s \frac{du_s}{dt} = \frac{U_B}{R_e} + C_B \frac{U_B}{dt}$$

يجب أن ألا ننسى أن توتر كل من المكثفتين C_B و C_s يتغير مع الزمن بسبب حدوث عمليتي الشحن والتفريغ في ان واحد ففي حين يشحن (C_B) يتم تفريغ عبر المقاومة R_e بالرجوع إلى المعادلة (1) وبتعويض U_d بقيمتها $R_d i$ نجد أن:

$$-U_s = R_d i + U_B$$

من المعادلة (3) في المعادلة السابقة نحصل على i : نعوض قيمة

$$(4) \quad -us = \frac{R_d}{R_e} U_B + R_d \cdot C_B \frac{dU_B}{dt} + U_B$$

نضرب طرفي المعادلة بـ C_s نأخذ تفاضل الطرفين بالنسبة للزمن نحصل على:

$$(5) \quad -C_s \frac{dus}{dt} = C_s \frac{R_d}{R_e} \cdot \frac{dU_B}{dt} + C_s \cdot C_b \cdot R_d \frac{d^2 U_B}{dt^2} + C_s \frac{dU_B}{dt}$$

فإذا ساوينا بين المعادلتين (5) و (3) نحصل على معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية تعطي علاقة التوتر النبضي U_B بالزمن بدلالة عناصر الدارة:

$$(6) \quad C_s \cdot C_b \cdot R_d \cdot R_e \frac{d^2 U_b}{dt^2} + (R_e C_s + C_s R_d + C_b R_e) \frac{dU_b}{dt} + U_b = 0$$

وسنكتبها على الشكل التالي:

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} + B_1 \frac{du(t)}{dt} + B_0 u(t) = 0$$

وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية حلها من الشكل:

$$u(t) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}]$$

$$\alpha_1 \text{ و } \alpha_2 = \frac{B_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0}$$

أما الثوابت B_1 و B_0 و K تختلف حسب نوع التوصيلة كما في الجدول (2-6)

الجدول (2-1) قيم الثوابت حسب نوع التوصيلة

التوصيلة	K		
A			
B			

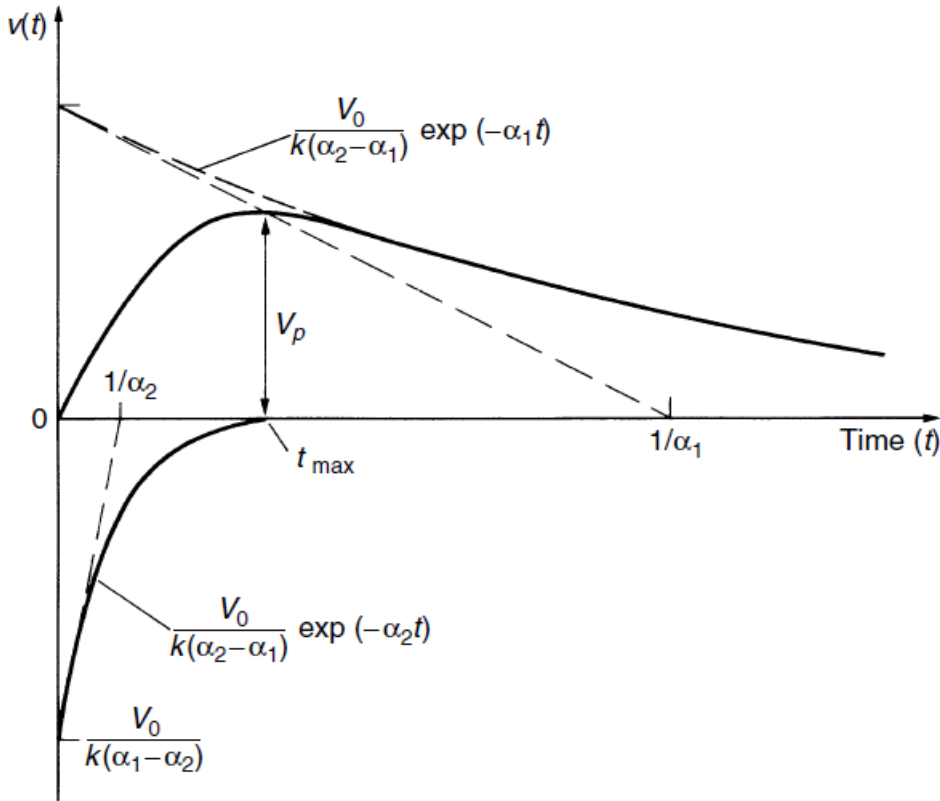
إن شكل التابع (25-2) أي شكل التوتر النبضي بدلالة الزمن يتحدد إذن من تطبيق تابعين أسيين فوق بعضها ثابتا هما الزمنيان هما $\frac{1}{\alpha_1}$ ، $\frac{1}{\alpha_2}$ وهذا يطابق من حيث المبدأ النبضي المطلوب.

إن القيمة العظمى للتوتر النبضي U_m أصغر دوما من توتر شحن المكثف (C_s) ويمكن حساب هذه القيمة العظمى كما يلي:

$$\frac{du(t)}{dt} = 0 = -\alpha_1 e^{-\alpha_1 t m} + \alpha_2 e^{-\alpha_2 t m}$$

$$t m = \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \text{ ومنه:}$$

$$U_m = \frac{U_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} [e^{-\alpha_1 t m} - e^{-\alpha_2 t m}]$$



الشكل (25-2) شكل التوتر النبضي الناتج من تطبيق تابعين أسيين فوق بعضها

بتعويض قيم $B_1 B_0$ ثم حساب $\alpha_1 + \alpha_2$ و $\alpha_1 \cdot \alpha_2$ نحصل على :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = B_1$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = B_0$$

وبحل المعادلات نحصل على عناصر المولد النبضي للتوصيلة لـ (A):

$$1 \quad R_e = \frac{1}{2(C_b + C_s)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_b}} \right]$$

$$2 \quad R_d = \frac{1}{2C_s} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_b}} \right]$$

عناصر المولد النبضي من اجل التوصيلة (B):

$$3 \quad R_e = \frac{1}{2(C_b + C_s)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_b}} \right]$$

$$4 \quad R_d = \frac{1}{2C_b} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_s}} \right]$$

2-3-4: حساب زمن الجبهة **Ts** وزمن نصف الظهر **Tr**:

إذا كانت جميع عناصر دارة المولد قد حسبت كما أوردنا آنفاً، فإنه يصبح من الممكن معرفة القيمة المتوقعة لزمن الجبهة وزمن نصف الظهر وذلك بشكل تقريبي، والسبب في كون القيم المتوقعة تقريبية هو أن الحساب يتم بالاستعانة بالعاملين a, b اللذين يتعلقان بدورهما بالقيم المطلوب حسابها، أما العلاقات التقريبية التي تعطي Tr و Ts :

الجدول (2-2) قيم الأزمنة بدلالة عناصر دائرة المولد

التوصيلة (B)	التوصيلة (A)
$T_1 = \frac{2}{b} R_d \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$T_1 = \frac{2}{b} \frac{R_e R_d}{(R_d + R_e)} \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$
$T_2 = \frac{1}{a} R_e (C_b + C_s)$	$T_2 = \frac{1}{a} (R_d + R_e) (C_b + C_s)$
$\mu = \frac{C_s}{(C_b + C_s)}$	$\mu = \frac{R_e C_s}{(C_b + C_s)(R_d + R_e)}$

ويعطي الجدول التالي كل القيم المطلوبة وذلك من أجل أربع موجات مختلفة :

الجدول (3-2) قيم الثوابت a و b لأربع موجات مختلفة

T_1/T_2	$\frac{1}{a}$	$\frac{2}{b}$	$\frac{1}{\alpha_1}$ بالميكرو ثانية	$\frac{1}{\alpha_2}$ بالميكرو ثانية
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104

الفصل الثالث

الدراسة العملية

المقدمة

حددت المواصفات القياسية الكهربائية مميزات الموجة النبضية وهي (المطال، الزمن الجبهي، زمن نصف الظهر)، كما فرضت النظم القياسية IEC طريقة إجراء الاختبارات النبضية البرقية على تجهيزات التوتر العالي (300) kv لذلك يتم السعي من خلال هذا البحث لإجراء تجارب مخبرية على مولد نبضي بعناصر محددة ثم تغيير هذه العناصر لمعرفة ذلك على مميزات الموجة النبضية بما فيها سعة العينة المختبرة. ثم إجراء حسابات رياضية لدارات المولد النبضي بتوصيلتين $A - B$ بمتغيراتها المختلفة، وتمثيل الموجة النبضية الناتجة، ثم إجراء عمليات نمذجة لهذه الدارات والتي يمكن أن تقدم معلومات عن مميزات الموجة في الحالات المختلفة مما يساعد على الاختصار للعديد من الاختبارات، ثم إجراء مقارنة نتائج عمليات النمذجة مع نتائج القياس المخبرية والحسابية لتحديد صلاحية عمليات النمذجة.

3-1: الدراسة العملية:

تم تقسيم الدراسة العملية إلى خمس مراحل وهي:

المرحلة الأولى: هي الطريقة المخبرية وتتمثل بقياس كل من زمن الجبهة T_s وزمن نصف الظهر T_r وذلك لنموذج مخبري لمولد نبضي موجود في مخابر التوتر العالي في جامعة دمشق ثم معرفة أثر تغيير عناصر المولد على كل من الزمنيين (T_r, T_s) . ولهذه الغاية تم ربط راسم إشارة إلى خرج دائرة المولد النبضي وإلى حاسب وذلك لمعالجة النبضات التي يتم الحصول عليها من أجل عملية قياس كل من (T_s, T_r) .

المرحلة الثانية: وهي الطريقة الحسابية وتتمثل بحساب كل من زمن الجبهة T_s وزمن نصف الظهر T_r وذلك للمولد النبضي السابق بواسطة قوانين عائدة للتوصيلة A أو التوصيلة B وذلك عند تغيير عناصر المولد النبضي وذلك باستخدام العلاقات المبينة سابقا في الجدول (2-7).

المرحلة الثالثة: هي الطريقة البرمجية وتتمثل بكتابة برنامج بلغة الماتلاب ويقوم هذا البرنامج بحساب كل من زمن الجبهة T_s وزمن نصف الظهر T_r والمردود وذلك للتوصيلتين A, B مع تغيير عناصر المولد النبضي

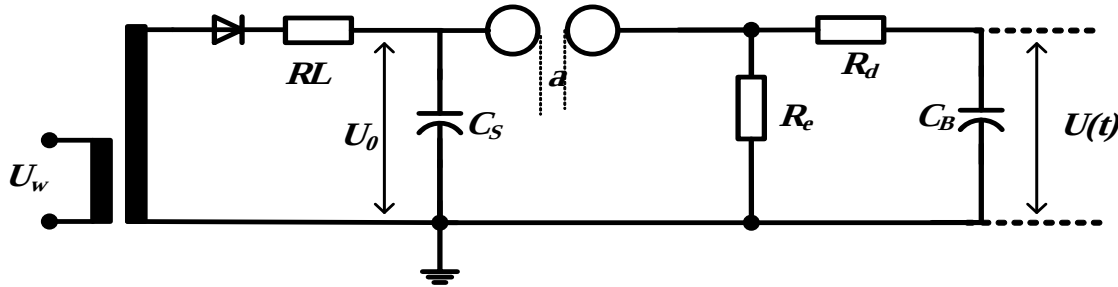
كما يقوم أيضاً برسم شكل موجة التوتر النبضي التي تم الحصول عليها، وذلك باستخدام واجهات تنفيذية تساعد في عمليات الإدخال للمتغيرات والثوابت حسب نوع التوصيلة.

المرحلة الرابعة: هي طريق النمذجة وتتمثل بنمذجة المولد النبضي ذو المرحلة الواحدة وقياس كل من T_s, T_r ومشاهدة شكل موجة الخرج مع تغير عناصر المولد النبضي ثم نمذجة المولد النبضي متعدد المراحل ومشاهدة موجة الخرج وحساب كل من T_r, T_s باستخدام برنامج الماتلاب **simpowersystems**.

المرحلة الخامسة: هي طريق النمذجة وتتمثل بنمذجة المولد النبضي ذو المرحلة الواحدة وقياس كل من T_s, T_r ومشاهدة شكل موجة الخرج مع تغير عناصر المولد النبضي ثم نمذجة المولد النبضي متعدد المراحل ومشاهدة موجة الخرج وحساب كل من T_r, T_s باستخدام **simulink**.

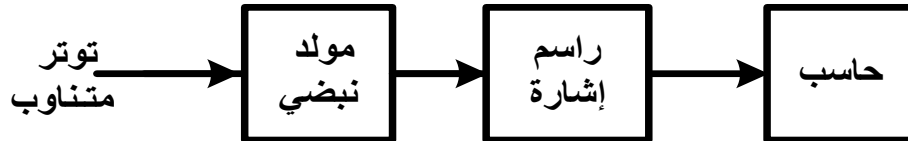
2-3: نتائج المرحلتين الأولى والثانية (المخبرية والحسابية):

يبين الشكل (1-3) نموذج دائرة مخبرية لتوليد التوتر العالي النبضي وذلك للتوصيلة B حيث تم تطبيق توتر شحن U_0 وهو توتر الشحن المستمر والذي نحصل عليه من دائرة شحن مؤلفة من محولة توتر عالي T ومن عنصر تقويم D ومن مقاومة شحن R_L .



الشكل (1-3) نموذج دائرة مخبرية لتوليد التوتر العالي النبضي

بعد تطبيق التوتر قمنا بتغير عناصر دائرة المولد النبضي لمعرفة تغيرات مميزات الموجة النبضية الناتجة. وقد تم الحصول على الموجة النبضية على راسم الإشارة [$\text{tim/div}=500[\mu\text{s}]$, [$\text{volt/div}=20[\text{v}]$], كما في الشكل (2-3) ثم قمنا بقياس كل من T_s, T_r من الحاسب وتم مقارنة القيم بالطريقة الحسابية :



الشكل (2-3) طريقة ربط الراسم مع الحاسب

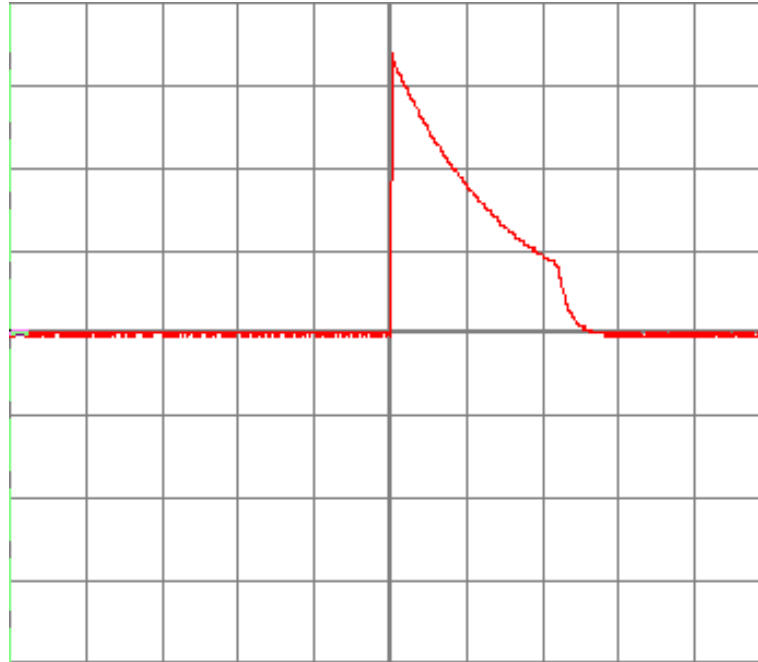
فحصلنا على النتائج التالية:

1-2-3: أثر تغير المقاومة R_d في التوصيلة (B) على أزمنة الموجة:

لقد قمنا بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر من الشكل الذي تم الحصول عليه من راسم الإشارة كما تم حساب هذه الأزمنة بالعلاقات الرياضية الجدول (2-2) العائدة للتوصيلة وذلك عند تغير مقاومة الشحن R_d مع ثبوت بقية عناصر المولد.

الحالة الأولى:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d =110\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	------------------



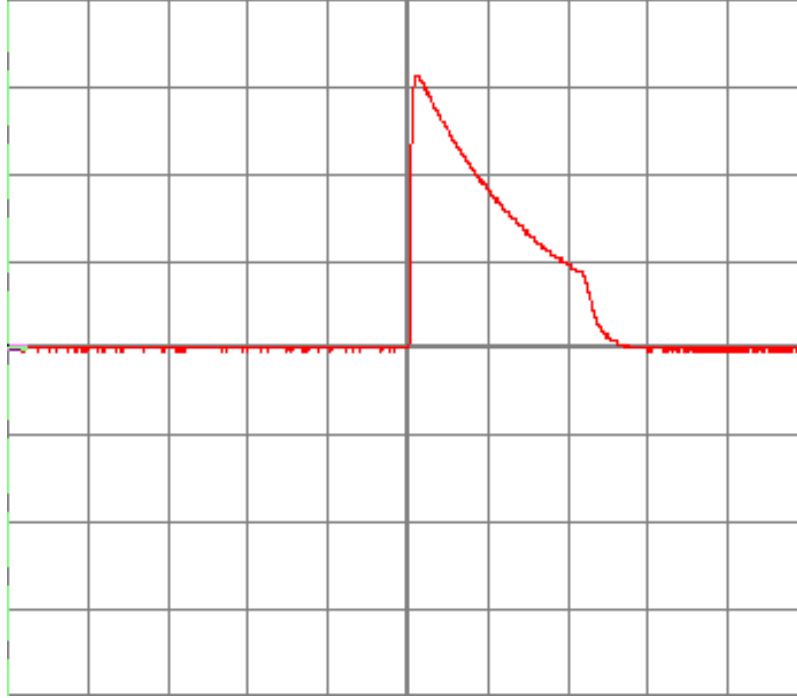
الشكل (2-3) الموجة النبضية الناتجة عند $\Omega R_d=110$

الجدول (1-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=110\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
6.5	650	6.5	600.6

الحالة الثانية:

$C_s=220\text{ nF}$	$C_b=22\text{ nF}$	$R_e=3.4\text{ K}\Omega$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$
---------------------	--------------------	--------------------------	---------------------------



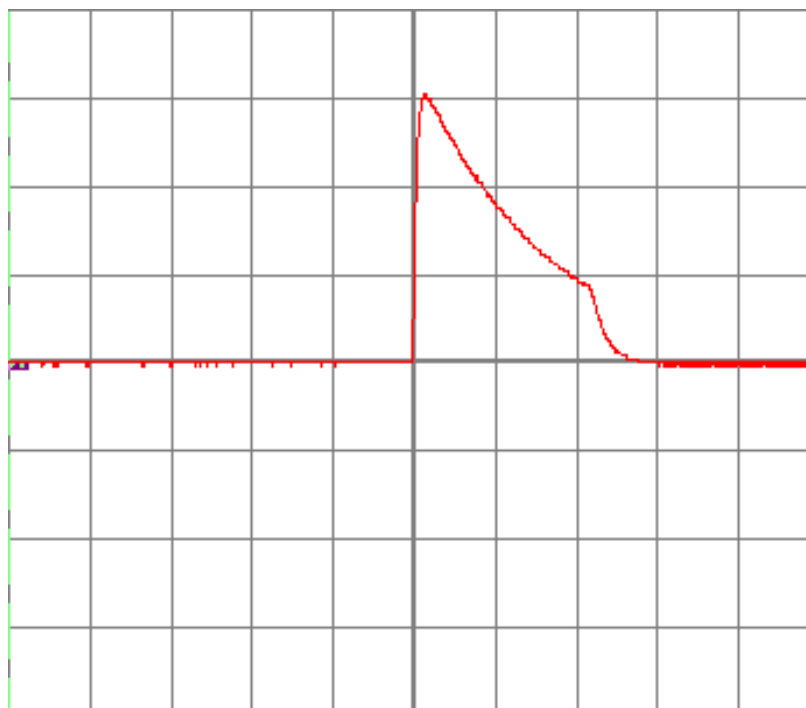
الشكل (3-4) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=0.54\text{k}\Omega$

الجدول (3-2) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=0.54\text{k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
30	650	32	600.6

الحالة الثالثة:

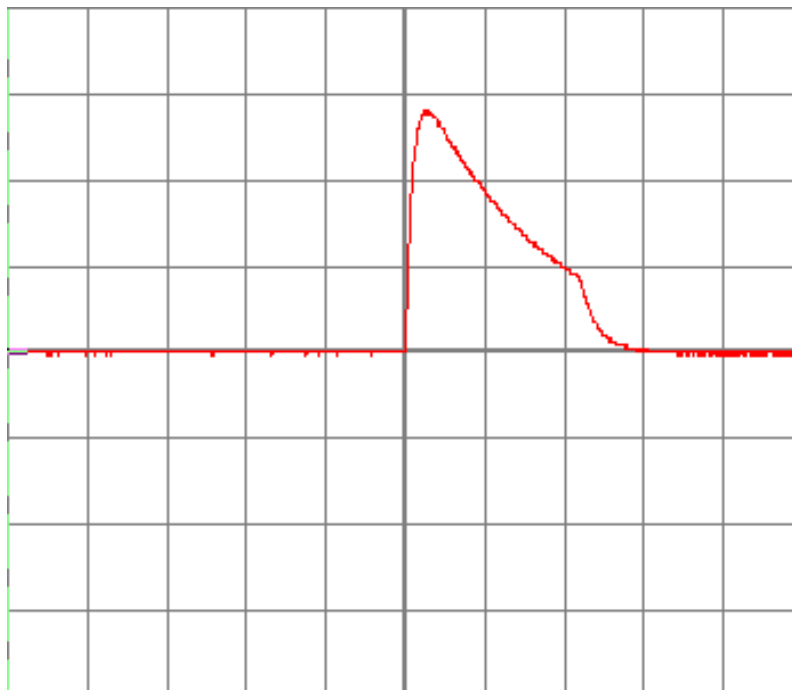
$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d = 1\text{K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	-------------------------

الشكل (3-5) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=1 \text{ k}\Omega$ الجدول (3-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=1\text{k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
59.2	700	59.2	600.4

الحالة الرابعة:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d =2.2 \text{ K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	----------------------------

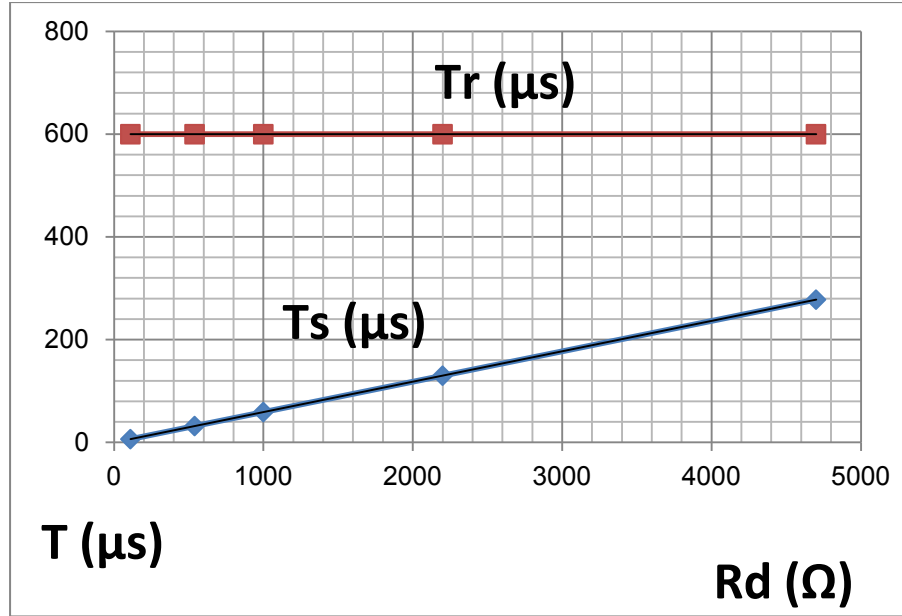
الشكل (3-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=2.2k\Omega$ الجدول (4-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_d=2.2k\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
130	785	130	600.4

يبين الجدول (5-3) النتائج وذلك عند تغير R_d مع ثبوت بقية عناصر المولدالجدول (5-3) نتائج تغيير المقاومة R_d بثبوت بقية عناصر الدارة

R_d	Ω	110	540	1000	2200	4700
T_s	μs	6.51	32	59.2	130	278
T_r	μs	600	600	600	600	600

ويبين الشكل (6-3) علاقة كل من T_r و T_s وذلك مع تغير مقاومة الشحن R_d



الشكل (6-3) T_r و T_s مع تغير مقاومة الشحن R_d

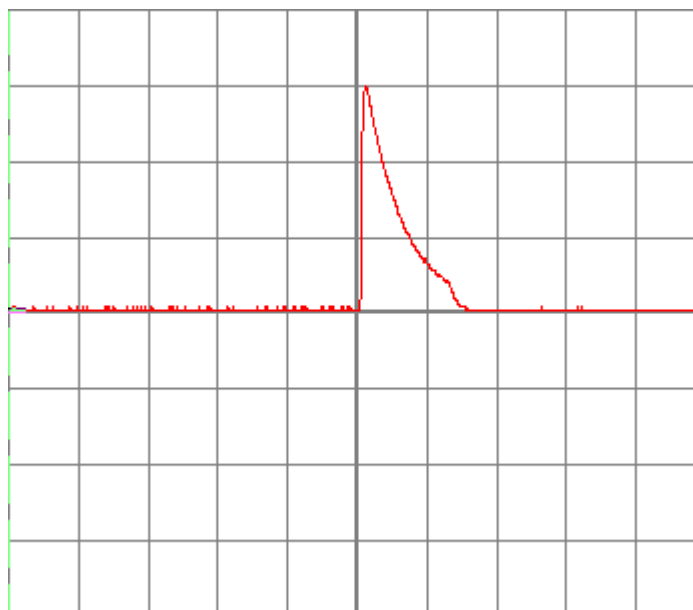
نلاحظ من الشكل انه كلما زادت قيمة R_d يزداد زمن الجبهة T_s بينما يبقى ثابت زمن نصف الظهر T_r وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب كل من T_r و T_s وذلك بالتوصيلة B.

3-2-2: أثر تغير المقاومة R_e في التوصيلة (B) على أزمنة الموجة:

لقد قمنا بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر من الشكل الذي تم الحصول عليه من راسم الإشارة كما تم حساب هذه الأزمنة بالعلاقات الرياضية العائدة للتوصيلة وذلك عند تغير مقاومة الشحن R_e مع ثبوت بقية عناصر المولد.

الحالة الأولى:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d = 0.54 \text{ K}\Omega$	$R_e = 1 \text{ K}\Omega$
----------------------	---------------------	------------------------------	---------------------------



الشكل (7-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e = 1\text{ k}\Omega$

الجدول (6-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e = 1\text{ k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
31.9	220	31.9	176.6

الحالة الثانية:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$	$R_e =2.2 \text{ K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	----------------------------



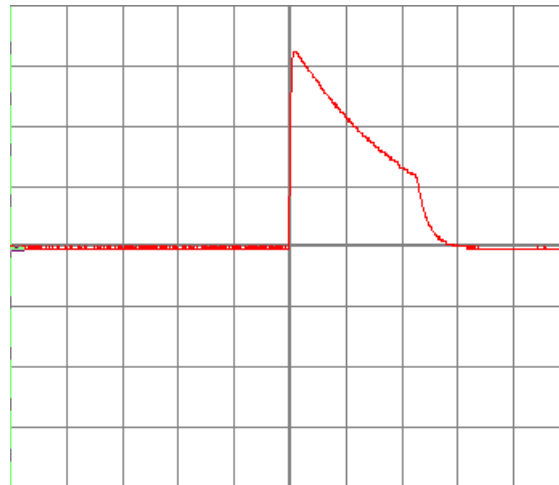
الشكل (8-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e=2.2\text{k}\Omega$

الجدول (7-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e=2.2\text{k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
31.9	425	31.9	388

الحالة الثالثة:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$	$R_e =4.7\text{K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	--------------------------



الشكل (9-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e=4.7 \text{ k}\Omega$

الجدول (8-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $R_e=4.7\text{k}\Omega$

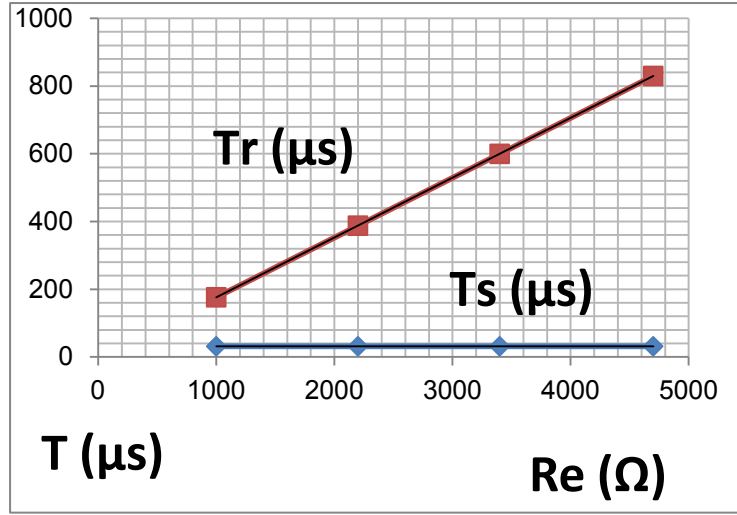
القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
31.9	800	31.9	830

يبين الجدول (9-3) نتائج تغير مقاومة التفريغ R_e وذلك بثبوت بقية عناصر المولد.

الجدول (9-3) نتائج تغير مقاومة التفريغ R_e بثبوت بقية عناصر المولد

R_e	Ω	1000	2200	3400	4700
T_s	μs	31.9	31.9	31.9	31.9
T_r	μs	176.6	388	600	830

ويبين الشكل (10-3) علاقة كل من T_r و T_s مع تغير مقاومة التفريغ R_e .

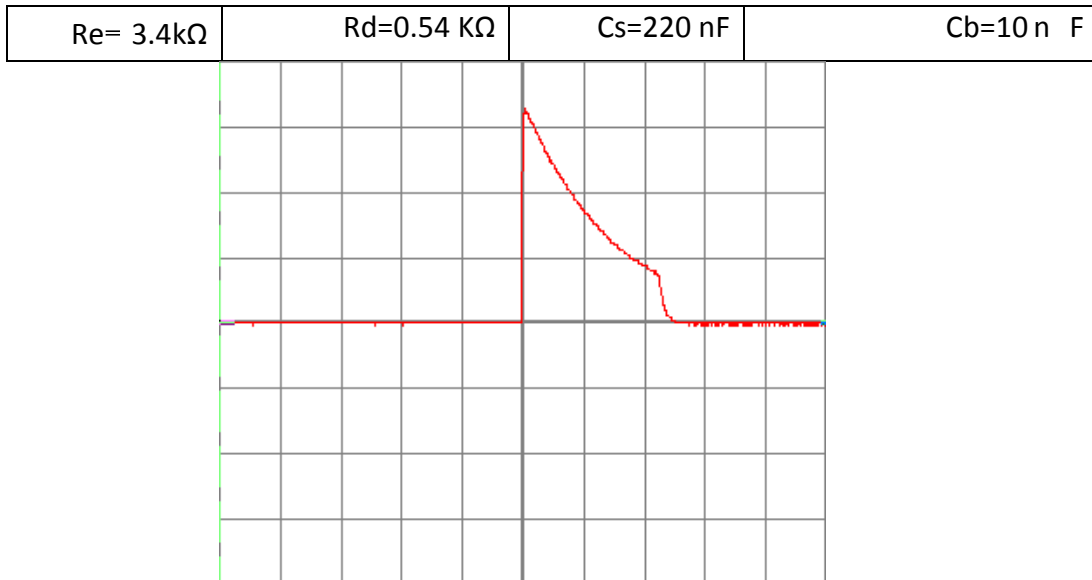


الشكل (10-3) علاقة T_r و T_s مع تغير R_e

نلاحظ من هذا الشكل انه كلما زادت مقاومة التفريغ R_e يزداد زمن نصف الظهر T_r ويبقى ثابت T_s وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب كل من T_r و T_s وذلك بالتوصيلة B.

3-2-3: أثر تغيير قيمة سعة الحمل C_b على أزمنة الموجة:

الحالة الأولى:



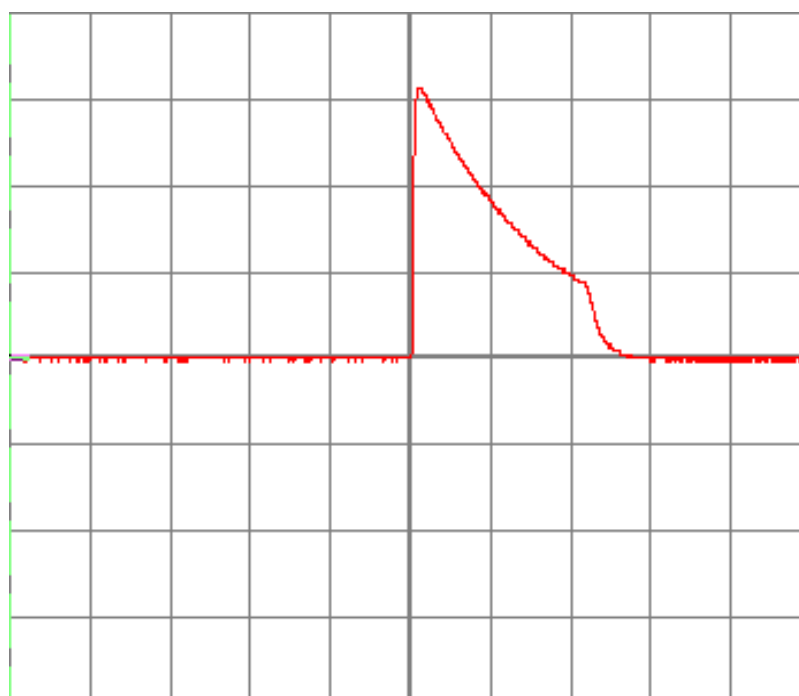
الشكل (11-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 10nF$

الجدول (10-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند تغيير سعة الحمل $C_b=10\text{nf}$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
15	560	15.2	570

الحالة الثانية:

$R_e = 3.4\text{k}\Omega$	$R_d = 0.54\text{ K}\Omega$	$C_s = 220\text{ nF}$	$C_b = 100\text{ n F}$
---------------------------	-----------------------------	-----------------------	------------------------



الشكل (12-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b=100\text{nF}$

الجدول (11-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند تغيير سعة الحمل $C_b=100\text{nf}$

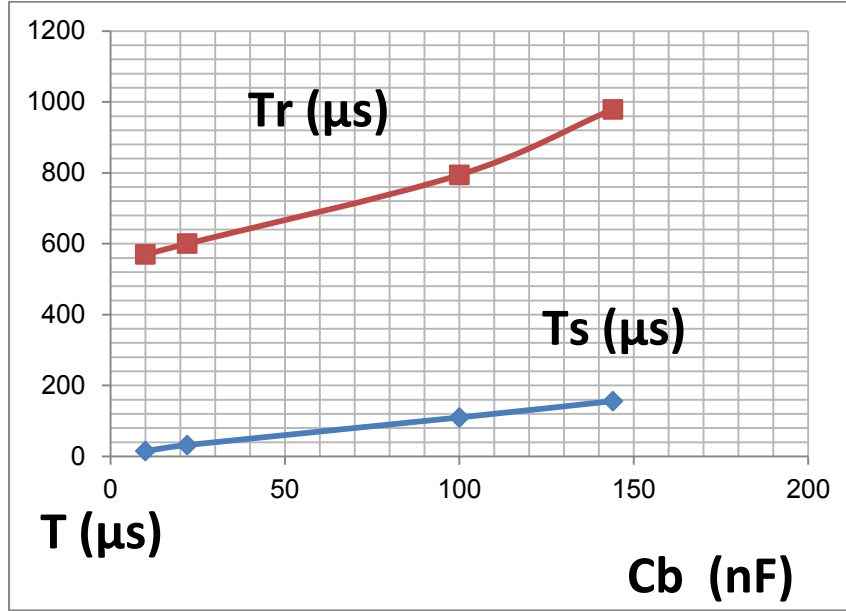
القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
100	750	109.8	794.2

يبين الجدول (3-12) نتائج تغير Cb وذلك بثبوت بقية عناصر المولد.

الجدول (3-12) نتائج تغير Cb بثبوت بقية عناصر المولد

Cb	nf	10	22	100
Ts	μs	15.2	32	109.8
Tr	μs	570	600.6	794.2

ويبين الشكل (3-13) علاقة كل من Ts و Tr مع تغير Cb



الشكل (3-13) علاقة Ts و Tr مع تغير Cb

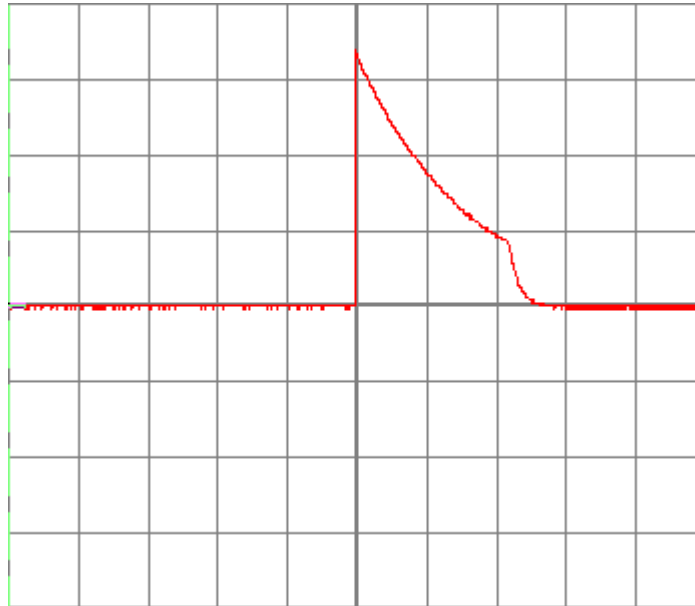
نلاحظ من هذا الشكل انه كلما زادت قيمة Cb يزداد زمن نصف الظهر بشكل واضح بينما يتغير زمن الجبهة Ts بشكل طفيف وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب Ts و Tr للتوصيلة B.

3-2-4: أثر تغير المقاومة Rd في التوصيلة (A) على أزمنة الموجة:

لقد قمنا بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر من الشكل الذي تم الحصول عليه من راسم الإشارة كما تم حساب هذه الأزمنة بالعلاقات الرياضية العائدة للتوصيلة وذلك عند تغير مقاومة الشحن Rd مع ثبوت بقية عناصر المولد للتوصيلة (A).

الحالة الأولى:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d =110\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	------------------



الشكل (3-14) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=110 \text{ k}\Omega$

الجدول (3-13) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=110 \Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
6.2	590	6.3	620

الحالة الثانية:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	---------------------------

الشكل (3-15) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=0.54 \text{ k}\Omega$ الجدول (3-14) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=0.54 \text{ k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
30	700	30	696

الحالة الثالثة:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_e=3.4 \text{ K}\Omega$	$R_d =2.2 \text{ K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	----------------------------



الشكل (3-16) الموجة النبضية الناتجة عند $R_d=2.2 \text{ k}\Omega$

الجدول (3-15) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_d=2.2 \text{ k}\Omega$

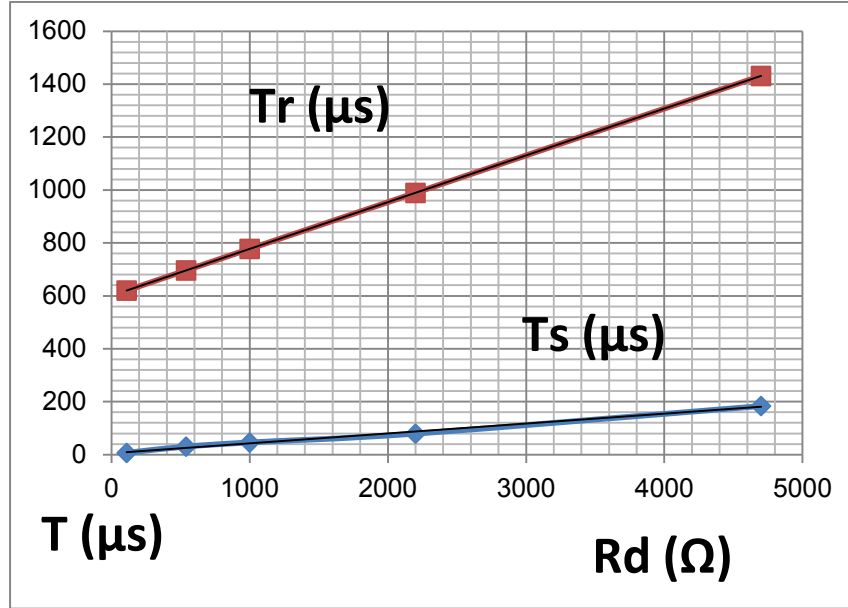
القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
79	1000	79	989.2

يبين الجدول (3-16) النتائج وذلك عند تغيير R_d مع ثبوت بقية عناصر المولد

الجدول (3-16) تغيير R_d بثبوت بقية عناصر المولد

R_d	Ω	110	540	1000	2200	4700
T_s	μs	6.3	30	45.7	79	183.6
T_r	μs	620	696	777.3	989.2	1431

ويبين الشكل (3-17) علاقة كل من T_s و T_r وذلك مع تغير مقاومة الشحن R_d



الشكل (3-17) علاقة T_s و T_r مع تغير R_d

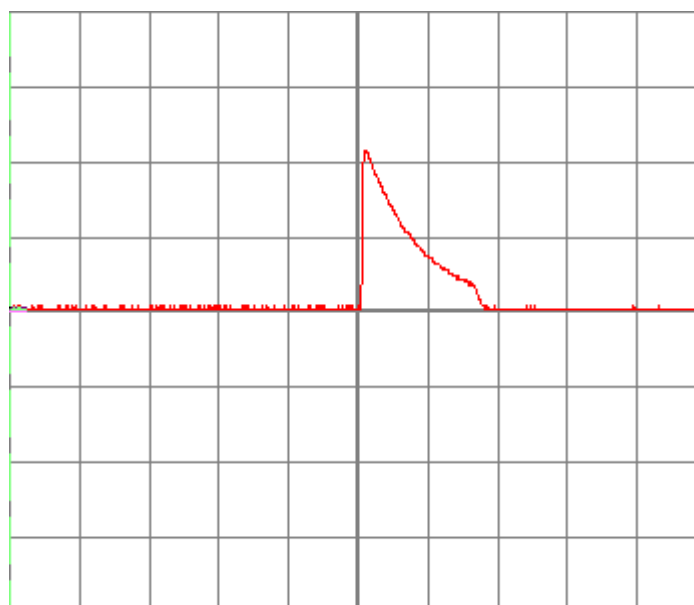
نلاحظ من الشكل انه كلما زادت قيمة R_d يزداد زمن الجبهة T_s ويتغير زمن نصف الظهر T_r وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب كل من T_s و T_r وذلك بالتوصيلة (A).

3-2-5: أثر تغير المقاومة R_e في التوصيلة (A) على أزمنة الموجة:

لقد قمنا بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر من الشكل الذي تم الحصول عليه من راسم الإشارة كما تم حساب هذه الأزمنة بالعلاقات الرياضية العائدة للتوصيلة A وذلك عند تغير R_e مقاومة التفريغ مع ثبوت بقية عناصر المولد.

الحالة الأولى:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$	$R_e =1\text{K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	------------------------



الشكل (3-18) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e=1 \text{ k}\Omega$

الجدول (3-17) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=1 \text{ k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
20	375	20	272

الحالة الثانية:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$	$R_e =2.2 \text{ K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	----------------------------



الشكل (3-19) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e=2.2\text{k}\Omega$

الجدول (3-18) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=2.2\text{k}\Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
31.9	425	31.9	388

الحالة الثالثة:

$C_s=220 \text{ nF}$	$C_b=22 \text{ nF}$	$R_d =0.54\text{K}\Omega$	$R_e =4.7\text{K}\Omega$
----------------------	---------------------	---------------------------	--------------------------

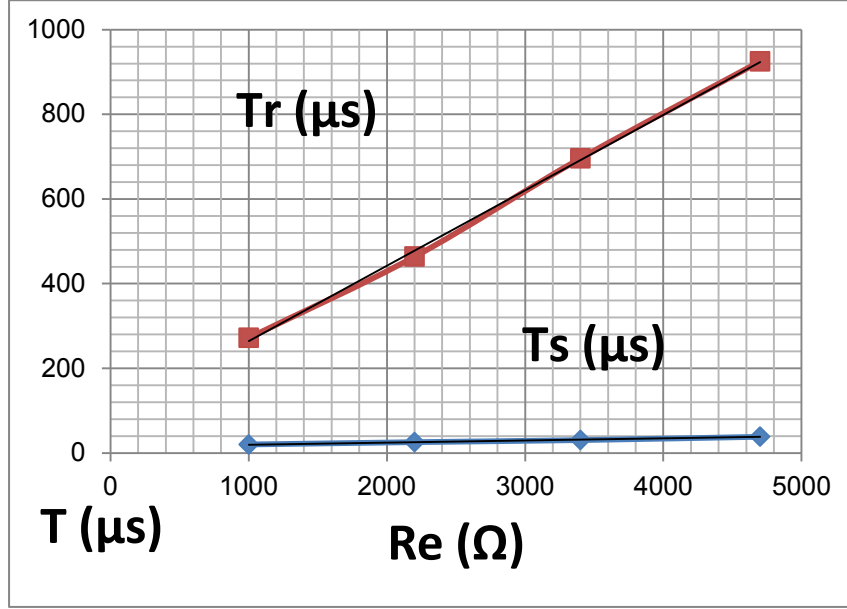
الشكل (20-3) الموجة النبضية الناتجة عند $R_e=4.7 \text{ k}\Omega$ الجدول (19-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $R_e=4.7\text{k} \Omega$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
28.6	900	28.6	925

يبين الجدول (20-3) نتائج تغير مقاومة التفريغ R_e وذلك بثبوت بقية عناصر المولد.الجدول (20-3) تغيير مقاومة التفريغ R_e بثبوت بقية عناصر المولد

R_e	Ω	1000	2200	3400	4700
T_s	μs	20	25.6	30.6	28.6
T_r	μs	272	484	696	925

ويبين الشكل (21-3) علاقة كل من T_r و T_s مع تغير مقاومة التفريغ R_e .

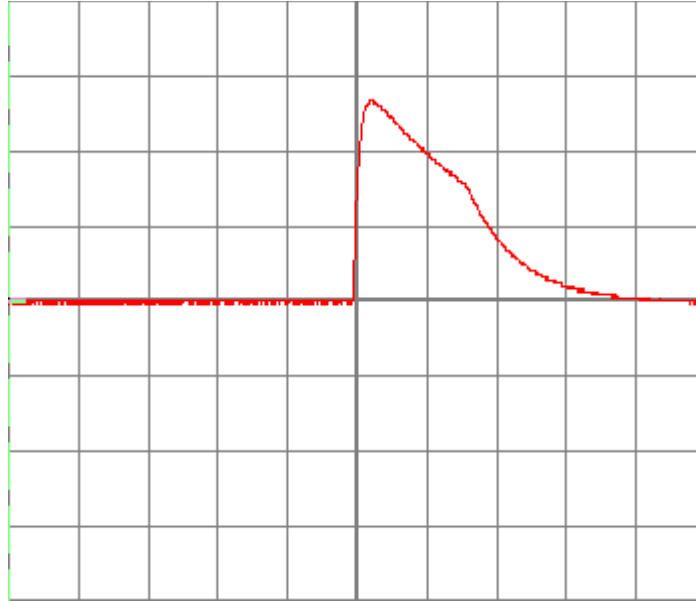


الشكل (21-3) علاقة T_r و T_s مع تغير R_e

نلاحظ من هذا الشكل انه كلما زادت قيمة R_e يزداد زمن نصف الظهر بشكل واضح بينما يتغير زمن الجبهة T_s بشكل طفيف وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب T_r و T_s للتوصيلة A.

3-2-6: أثر تغيير قيمة سعة الحمل C_b على ازمة الموجة:الحالة الأولى:

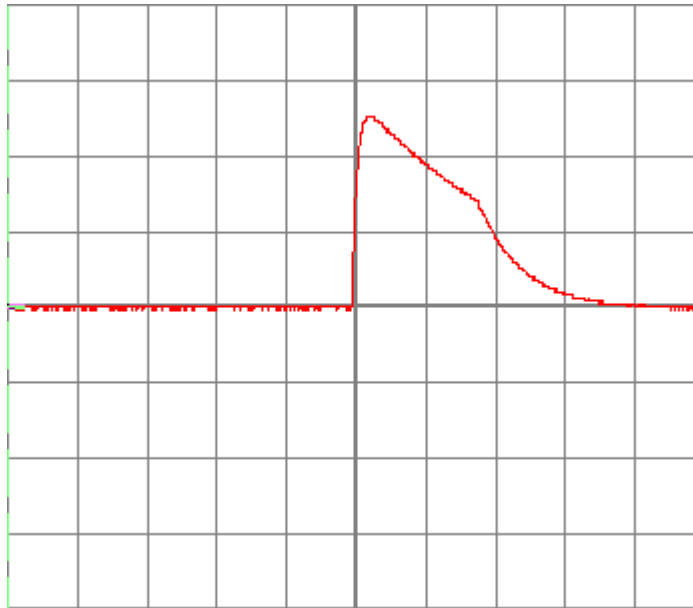
$R_e = 3.4k\Omega$	$R_d = 0.54 K\Omega$	$C_s = 220 nF$	$C_b = 10 n F$
--------------------	----------------------	----------------	----------------

الشكل (3-22) الموجة النبضية الناتجة عند $C_b = 10nF$ الجدول (3-21) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_b = 10nF$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$	$T_s[\mu s]$	$T_r[\mu s]$
13	670	13.1	661.6

الحالة الثانية :

Re= 3.4k Ω	Rd=0.54 K Ω	Cs=220 nF	Cb=100 n F
-------------------	--------------------	-----------	------------



الشكل (3-23) الموجة النبضية الناتجة عند Cb=100nF

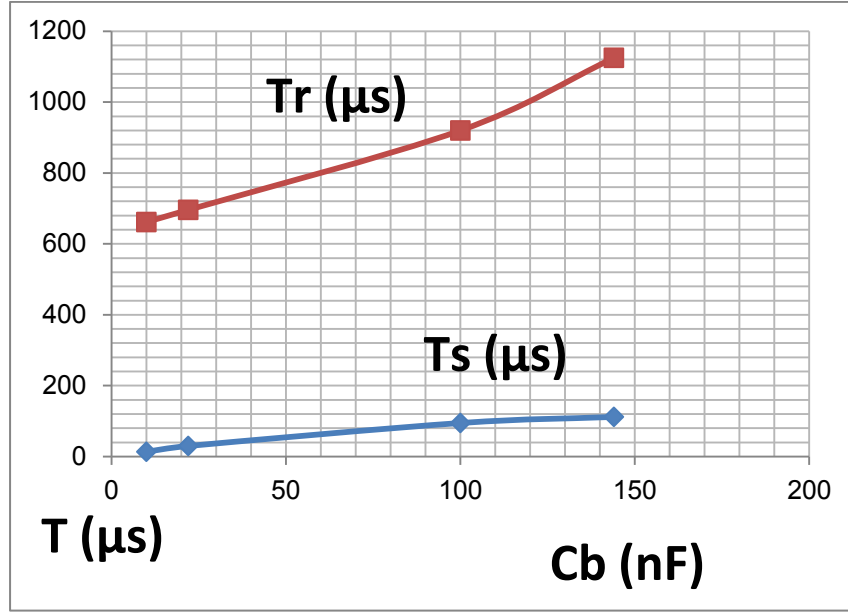
الجدول (3-22) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند Cb=100nF

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
Ts[μ s]	Tr[μ s]	Ts[μ s]	Tr[μ s]
94	850	94	920

الجدول (3-23) تغيير قيمة Cb بثبوت بقية عناصر المولد

Cb	nf	10	22	100
Ts	μ s	13.1	30	94
Tr	μ s	661.6	696	920

ويبين الشكل (24-3) علاقة كل من T_r و T_s مع تغير C_b



الشكل (24-3) علاقة كل من T_r و T_s مع تغير C_b

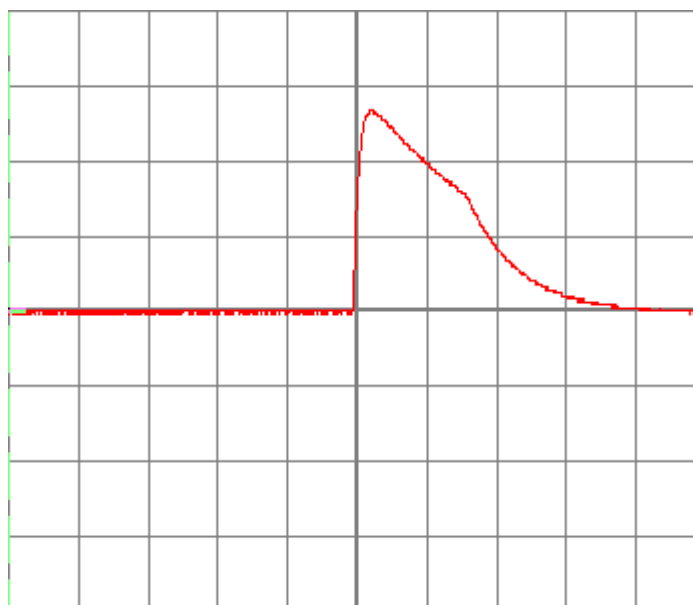
نلاحظ من هذا الشكل انه كلما زادت قيمة C_b يزداد زمن نصف الظهر بشكل واضح بينما يتغير زمن الجبهة T_s بشكل طفيف وهذا ما يتطابق مع العلاقات الرياضية لحساب T_r و T_s للتوصيلة A.

3-2-7: أثر إضافة حمل سعوي CP للدائرة التوصيلة (B) على أزمنة الموجة النبضي:

لقد قمنا بحساب زمن الجبهة وزمن نصف الظهر من الشكل الذي تم الحصول عليه من راسم الإشارة كما تم حساب هذه الأزمنة بالعلاقات الرياضية العائدة للتوصيلة B وذلك عند إضافة حمل سعوي C_p مع ثبوت بقية عناصر المولد وذلك لمعرفة مدى تأثير سعة الحمل المختبر على محددات الموجة النبضية.

الحالة الأولى:

$C_b=10\text{ nF}$	$C_s=220\text{ nF}$	$R_e= 3.4\text{k}\Omega$	$R_d=0.54\text{ K}\Omega$	$C_P=10\text{ nF}$
--------------------	---------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------



الشكل (25-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p=10\text{nF}$

الجدول (24-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $C_p=10\text{nF}$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
29	600	29.3	595.68

الحالة الثانية:

$C_b=10 \text{ nF}$	$C_s=220 \text{ nF}$	$R_e= 3.4\text{k}\Omega$	$R_d=0.54 \text{ K}\Omega$	$C_P=100 \text{ nF}$
---------------------	----------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------

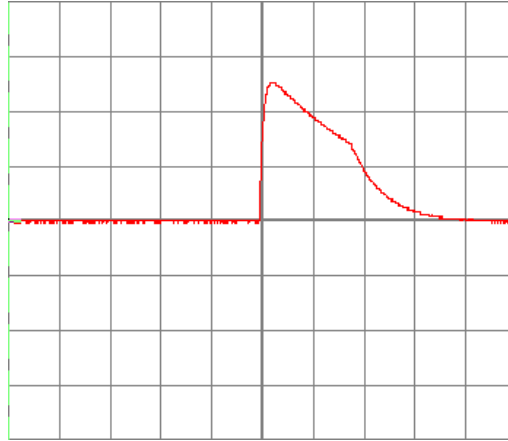
الشكل (26-3) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p=100\text{nF}$ الجدول (25-3) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة B عند $C_p=100\text{nF}$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
117	750	117.2	819

3-2-8: أثر إضافة حمل سعوي CP للدائرة التوصيلة (A) على ازمة الموجة النبضية:

الحالة الأولى:

Cb=10 nF	Cs=220 nF	Re= 3.4k Ω	Rd=0.54 K Ω	CP=10 nF
----------	-----------	-------------------	--------------------	----------



الشكل (3-27) الموجة النبضية الناتجة عند Cp=10nF

الجدول (3-26) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند Cp=10nF

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
Ts[μ s]	Tr[μ s]	Ts[μ s]	Tr[μ s]
25	950	25	949

الحالة الثانية:

$C_b=10 \text{ nF}$	$C_s=220 \text{ nF}$	$R_e= 3.4\text{k}\Omega$	$R_d=0.54 \text{ K}\Omega$	$C_P=100 \text{ nF}$
---------------------	----------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------

الشكل (3-28) الموجة النبضية الناتجة عند $C_p=100\text{nF}$ الجدول (3-27) القيم الحسابية والتجريبية للتوصيلة A عند $C_p=100\text{nF}$

القيم التجريبية		القيم الحسابية	
$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$	$T_s[\mu\text{s}]$	$T_r[\mu\text{s}]$
101	950	101.12	947.1

إضافة حمل سعوي CP للدائرة في التوصيلة (B):

الجدول (3-28) تغيير حمل سعوي CP للتوصيلة B

Cp	nf	10	100	الاحمل
T_s	μs	29.3	117.2	15.2
T_r	μs	595.68	819	570

إضافة حمل سعوي CP للدائرة في التوصيلة (A):

الجدول (3-29) تغيير حمل سعوي Cp للتوصيلة A

اللاحمل	100	10	Cp	nf
13.1	101.12	25	Ts	μs
661.6	947.1	949	Tr	μs

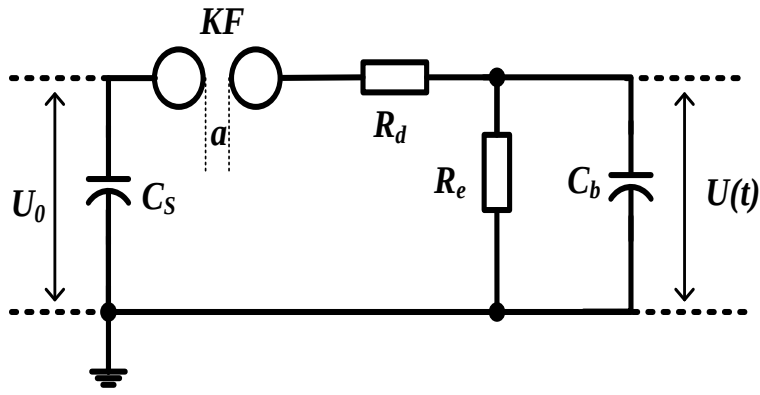
نلاحظ من خلال النتائج أن الجسم المختبر بالتوتر النبضي يمثل حمولة سعوية Cp تربط على التفرع مع السعة Cb يؤدي إلى زيادة الزمن الجبهي Ts بشكل ملحوظ وتغير Tr بشكل تقريبي في التوصيلة B. كذلك بالنسبة للتوصيلة A، لذلك لا بد من اختبار أثر الجسم المختبر على شكل النبضة قبل بدء القياس، ويتم ذلك بتطبيق عدة نبضات على الجسم المختبر ثم يرصد شكل النبضة بواسطة راسم إشارة فإذا كان هذا الأثر بحدود التسامح المسموح به للنبضة عندها يمكن إهماله وإذا كان خارج حدود التسامح لا بد من تغير عناصر المولد حتى يصبح شكل النبضة ضمن الحد المسموح به.

نتائج المراحل الثالثة والرابعة والخامسة:

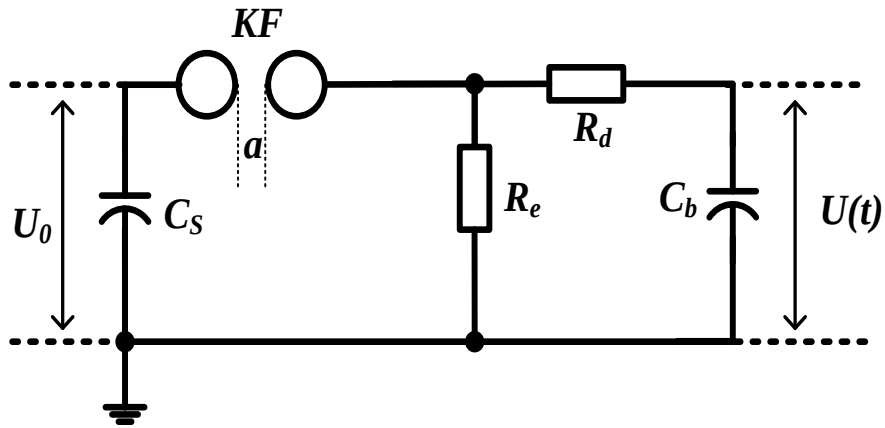
تتمتع البيئة البرمجية Matlab بمكتبة ضخمة جداً، يمكن من خلالها القيام بعملية نمذجة ومحاكاة لكافة العناصر والتجهيزات المستخدمة في نظم القدرة الكهربائية، وغيرها من النظم الهندسية. حيث هناك ثلاث إمكانيات للبرمجة: الأولى برمجية تعتمد على البرنامج GUI والثانية من خلال المكتبة simpowersys، والثالثة Simulink وسوف تستخدم هذه البرامج الثلاث في هذا العمل.

3-3: الطريقة البرمجية باستخدام البيئة GUI:

تتمثل هذه الطريقة بكتابة برنامج بلغة Matlab ويقوم هذا البرنامج بحساب كل من زمن الجبهة Ts وزمن نصف الظهر Tr والمردود وذلك للتوصيلتين A, B مع تغير عناصر المولد النبضي كما يقوم أيضاً برسم شكل موجة التوتر النبضي التي تم الحصول عليها، وذلك باستخدام واجهات تنفيذية تساعد في عمليات الإدخال للمتغيرات والثوابت حسب نوع التوصيلة. تعتمد هذه الطريقة بكتابة برنامج بلغة Matlab اعتماداً على المعادلات النهائية الممثلة للدائرة ثم إظهار النتائج المعتمدة من خلال واجهات تنفيذية، حيث يتم إدخال القيم الأساسية، فتظهر النتائج في نوافذ الإظهار المخصصة لذلك.



دائرة المولد النبضي توصيلة A



دائرة المولد النبضي توصيلة B

يبين الشكل (3-29) واجهة البرنامج المستخدم لهذه الغاية.



الشكل (3-29) واجهة البرنامج التنفيذية

حيث تظهر في كل واجهة نوافذ إدخال محددات عناصر المولد الأساسية، ثم يقوم البرنامج وفقاً لرغبة المستخدم برسم شكل موجة التوتر النبضي البرقي، وحساب الأزمنة المتعلقة بها، وكذلك مردود المولد في كل مرة، مع إمكانية تغيير كل عنصر من عناصر المولد في كل مرة ومشاهدة أثر ذلك على كل من T_s و T_r المردود.

حيث تم كتابة البرنامج بلغة Matlab والذي يقوم بحساب كل من زمن الجبهة T_s وزمن نصف الظهر T_r والمردود $\square$ وذلك للتوصيلة A والتوصيلة B مع إمكانية اظهار شكل موجة الخرج الناتجة مع تغيير عناصر المولد النبضي وذلك من اجل مطابقة النتائج مع القيم النظامية لموجة البرق.

3-3-1: نتائج نمذجة المولد النبضي مرحلتين، توصيلة (A):

يبين الشكل (3-30) مولد نبضي مرحلتين موجود في مخابر التوتر العالي في قسم هندسة الطاقة الكهربائية. كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.



الشكل (3-30) المولد النبضي العملي الموجود في المختبر

وتعطى عناصر كل مرحلة لهذا المولد بالقيم التالية في الجدول:

--	--	--	--

$$C'_s = 10000 \text{ pF}$$



$$C'_b = 1200 \text{ pF}$$



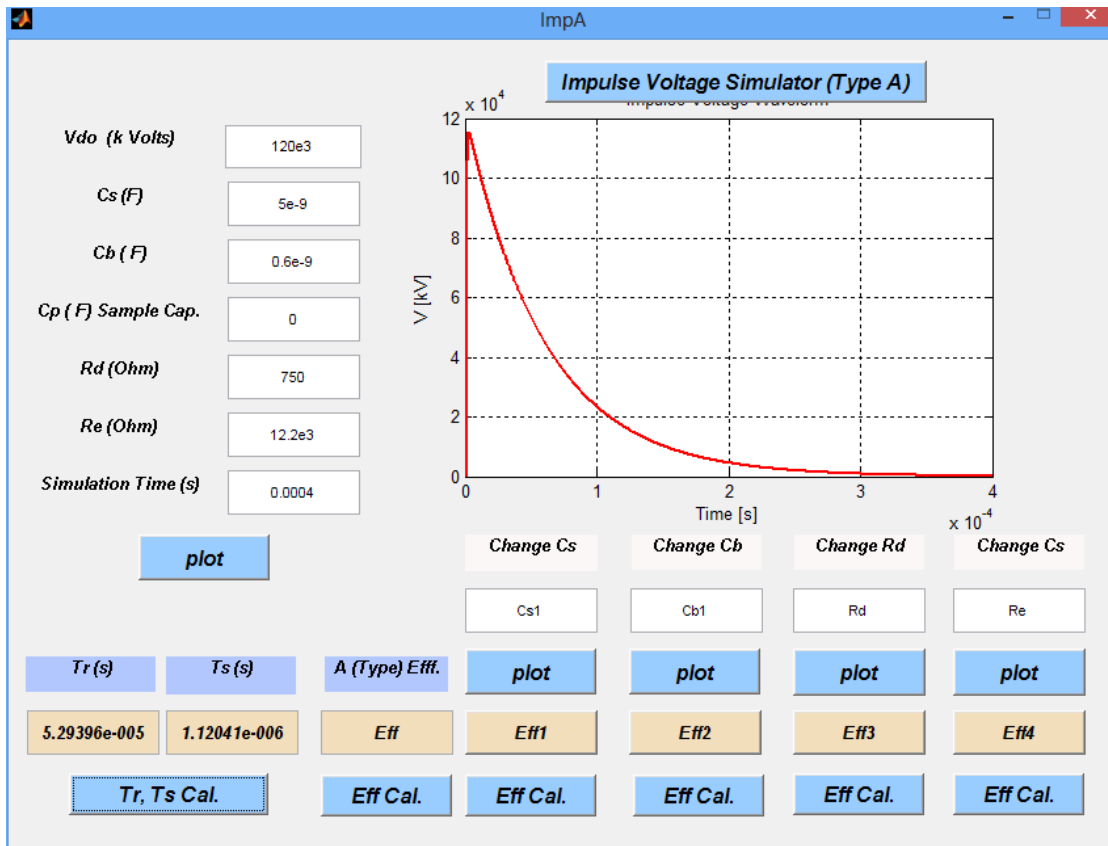
$$R'_d = 375 \Omega$$



$$R'_e = 6100 \Omega$$

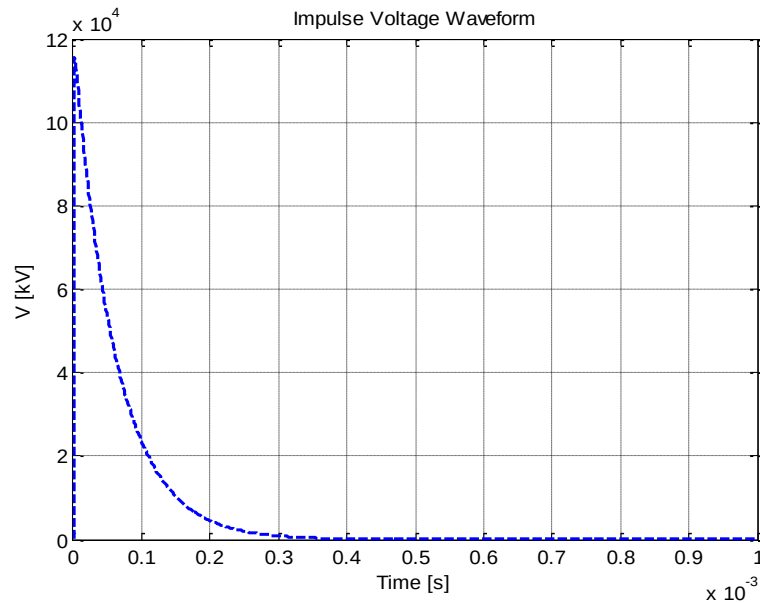


وبإدخال عناصر الدارة المكافئة إلى واجهة البرنامج، نحصل على شكل الموجة النبضية المبينة في الشكل التالي:



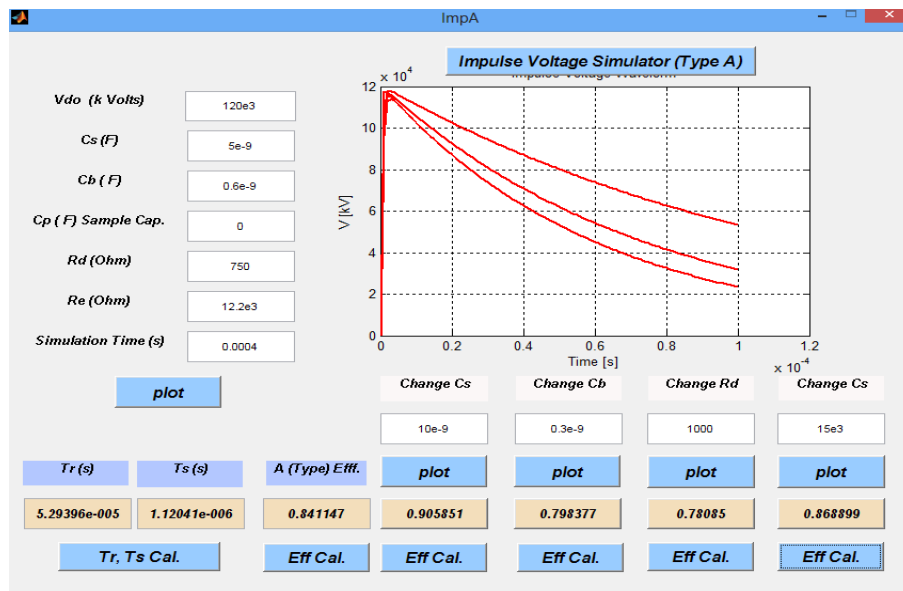
الشكل (31-3) واجهة الإدخال لبرنامج الحساب توصيلة A

من هذا الشكل نجد إن قيم الأزمنة لهذه الموجة هي تطابق موجة البرق النظامية وتساوي $T_s = 1.12 \mu s$ و $T_r = 52 \mu s$ وهذا ما يوضحه الشكل (32-3)



الشكل (32-3) موجة الخرج الناتجة التوصيلة A

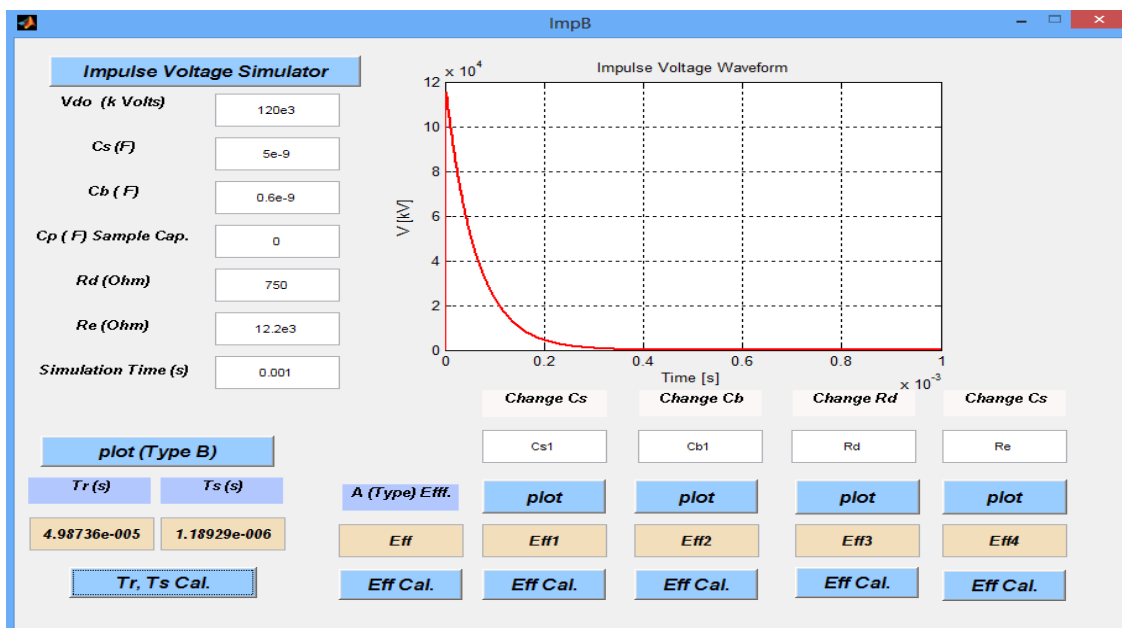
وبتغير عناصر دائرة المولد النبضي نلاحظ إن مميزات الموجة النبضية (T_s, T_r) تتغير كما في الشكل (33-3)



الشكل (33-3) تغير مميزات موجة التوتر مع تغير عناصر المولد

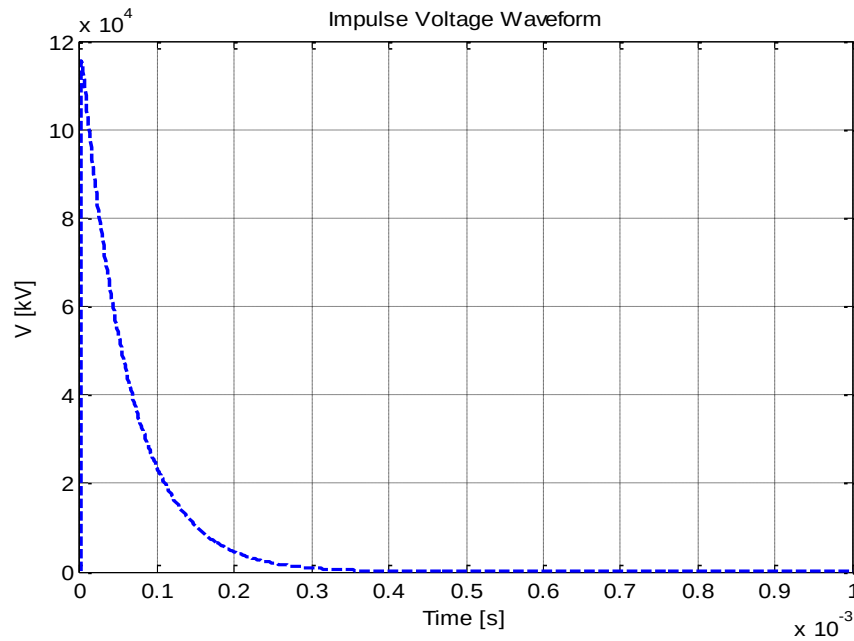
2-3-3: نتائج نمذجة المولد النبضي مرحلتين، التوصيلة (B):

يبين الشكل (34-3) واجهة الإدخال للبرنامج وذلك للتوصيلة B.



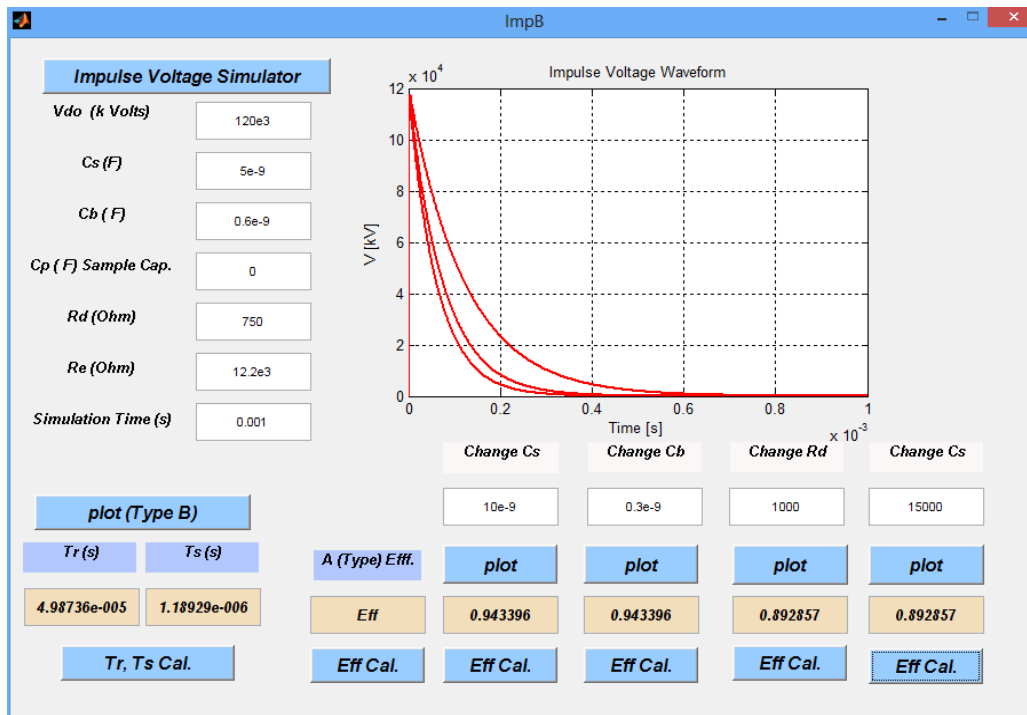
الشكل (34-3) واجهة الإدخال للبرنامج للتوصيلة B

من هذا الشكل نجد أن قيم الأزمنة الناتجة عن هذا البرنامج وهي: $T_r=49.8\mu s$ ، $T_s=1.18\mu s$ ، وهي مطابقة لموجة البرق النظامية وهذا ما يوضحه الشكل (3-35) موجة الخرج الناتجة.



الشكل (3-35) موجة الخرج الناتجة التوصيلة B

يبين الشكل (3-36) موجة الخرج وذلك بتغيير عناصر المولد وذلك للتوصيلة B



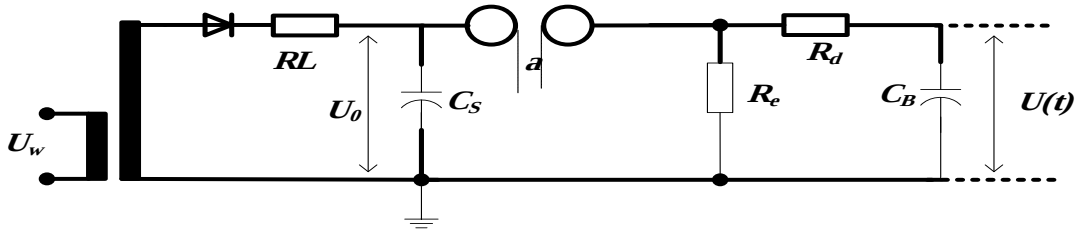
الشكل (3-36) موجة الخرج مع تغيير عناصر المولد

3-4: نتائج المرحلة الرابعة:

تتمتع البيئة البرمجية Matlab بمكتبة ضخمة جداً، يمكن من خلالها القيام بعملية نمذجة ومحاكاة لكافة العناصر والتجهيزات المستخدمة في نظم القدرة الكهربائية، وغيرها من النظم الهندسية. حيث هناك ثلاث إمكانيات للبرمجة: الأولى من خلال المكتبة **simpowersys**، والثانية **Simulink**، والثالثة برمجة تعتمد على البرنامج GUI. (وقد تم شرحها سابقاً في الفقرة 3-3).

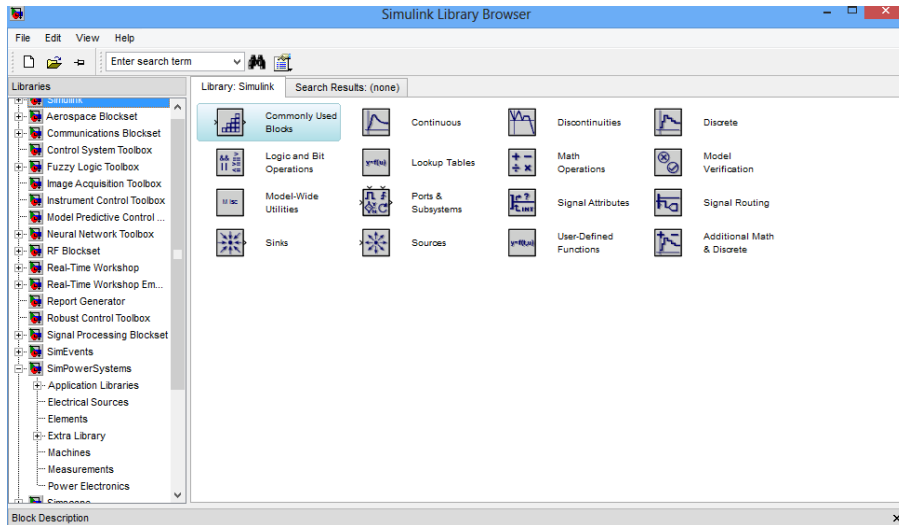
3-4-1 النمذجة باستخدام البيئة **simpowersys**:

تتضمن هذه المكتبة معظم عناصر نظم القدرة، يمكن من خلالها تنفيذ أي دائرة كهربائية، وإجراء عمليات النمذجة المطلوبة. ولتشكيل دائرة المولد النبضي البرقي توصيلة B المبينة بالشكل (3-37).



الشكل (3-37) دائرة المولد النبضي البرقي توصيلة B

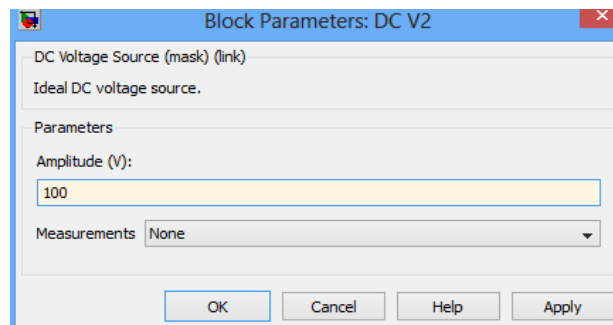
نحتاج لمنبع توتر مستمر U_0 ، يمكن من خلاله شحن المكثف C_s ، للقيام بذلك يتم تشغيل برنامج Matlab، ثم الذهاب إلى البنية Simulink Library Browser ثم اختيار البيئة **simpowersys** المذكورة، كما هو مبين في الشكل (3-38).



الشكل (3-38) واجهة Simulink Library Browser

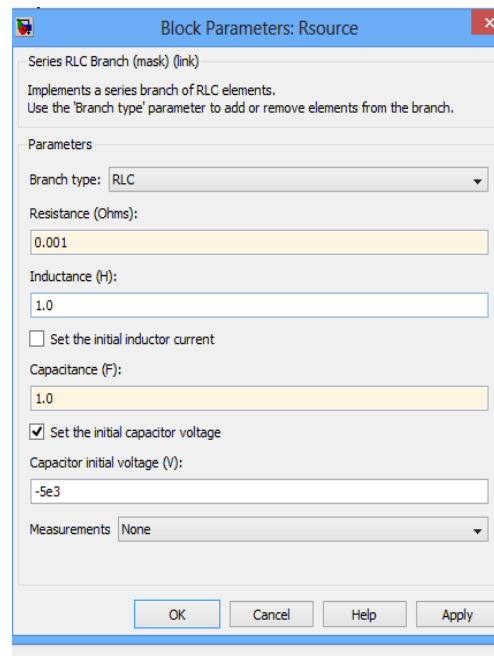
تعد المكتبة الفرعية **simpowersys** من المكتبات الهامة في بيئة Matlab لأنها تختص بنمذجة عناصر نظم القدرة الكهربائية ومحاكاتها، وقد زودت هذه المكتبة بمجموعة من المكتبات الفرعية التي تحتوي على مكونات تمثل عناصر نظم القدرة وهي تحاكي الغالبية العظمى في الحياة العملية، وكل عنصر من العناصر يتم ربطه بصندوق حوار مع المستثمر بحيث يتم استدعاؤه عند الاستخدام دون السماح بالدخول إلى النموذج الرياضي الذي يبنى من خلاله هذا العنصر.

من المكتبة الفرعية **Electrical Source**، والتي تحوي على مجموعة من العناصر التي تمثل المصادر الكهربائية التي نصادفها في الدارات الكهربائية، حيث نأخذ منها منبع توتر مستمر، وندخل قيمة التوتر المرغوب فيها كما هو مبين في الشكل (3-39).



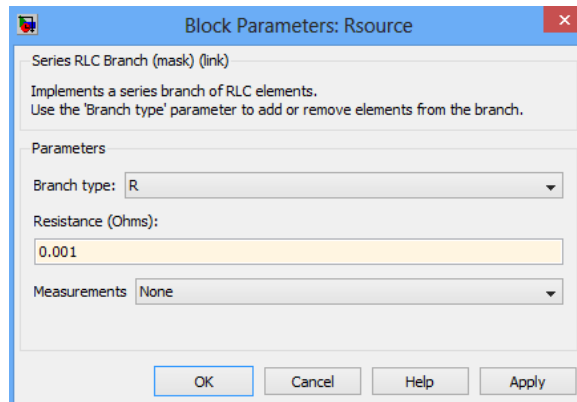
الشكل (3-39) ادخال قيمة منبع التوتر المستمر في واجهة **Electrical Source**

من المكتبة الفرعية **Element** والتي تحوي على مقاومات وملفات ومكثفات نختار الواجهة التالية كما هو مبين في الشكل (3-40).



الشكل (3-40) واجهة المكتبة الفرعية Element

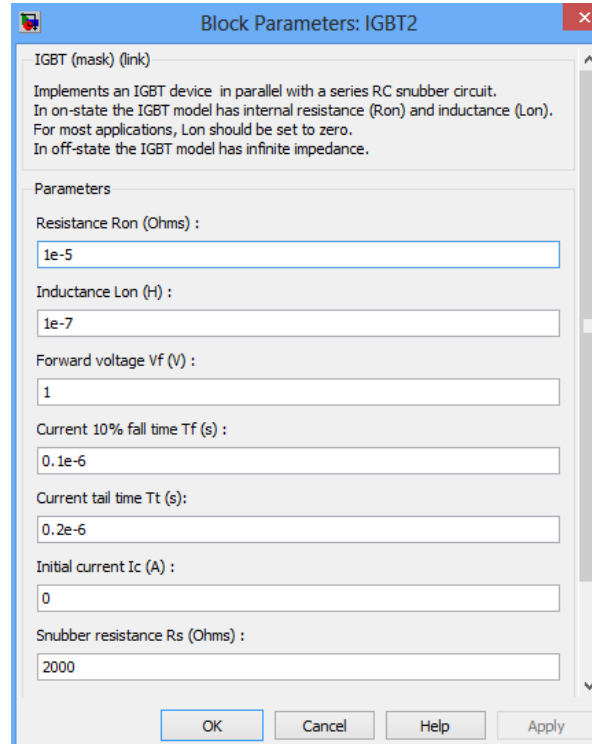
من هذه الواجهة وبما ان المنبع يحتاج إلى مقاومة داخلية R_{source} ، نختار المقاومة وقيمتها كما هو مبين في الشكل (3-41).



الشكل (3-41) واجهة المكتبة الفرعية Element

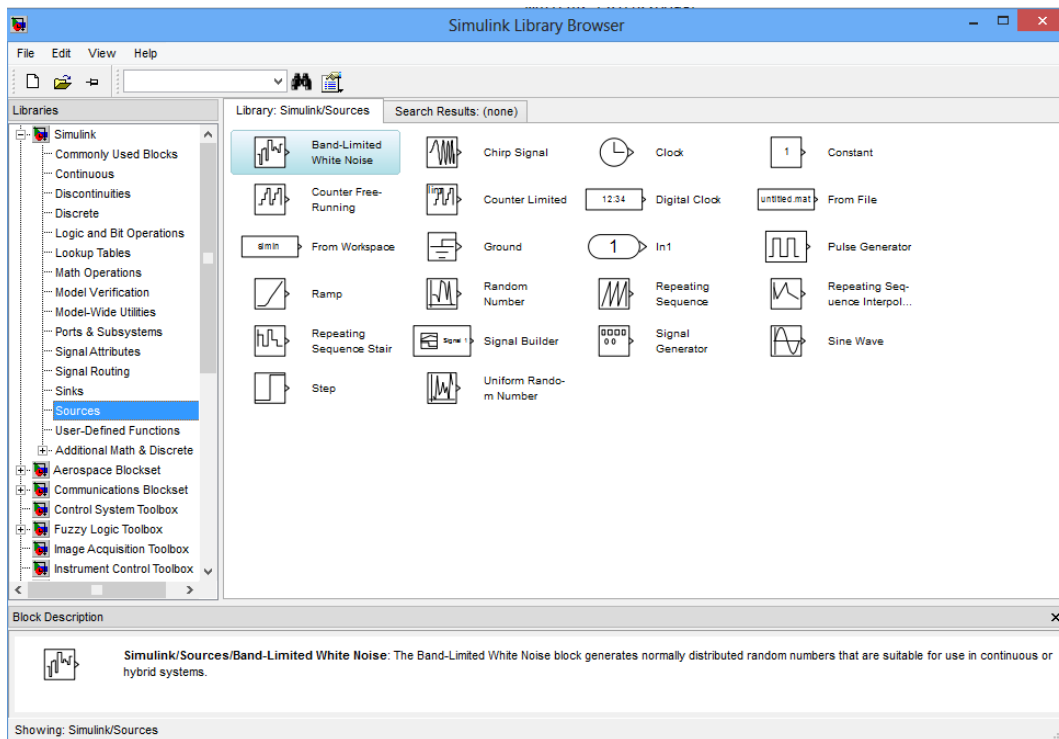
والتي نختار قيمة مقاومة داخلية R_{source} من نفس المكتبة Element، نختار منها بقية عناصر الدارة، وهي مقاومة الشحن R_d ومقاومة التفريغ R_e ومكثف الحمل C_B . يستخدم في المولد النبضي البرقي ثغرة الكرات كقاطع ستاتيكي (ساكن)، حيث ينهار عندما يصل توتر المكثف C_S لقيمة معينة. ولقد تم استبدال هذه الثغرة بقواطع إلكترونية من نوع IGBT من المكتبة الفرعية Power Electronics، حيث

أن الزمن اللازم لعملية الوصل والفصل في هذه القواطع صغير جداً من مرتبة النانو ثانية وهذا ما تتطلبه الأزمنة لموجة البرق المعيارية. نختار هذا القاطع من المكتبة Power Electronics، ويتم ادخال محددات القاطع IGBT2 كما هو مبين في الشكل (3-42).



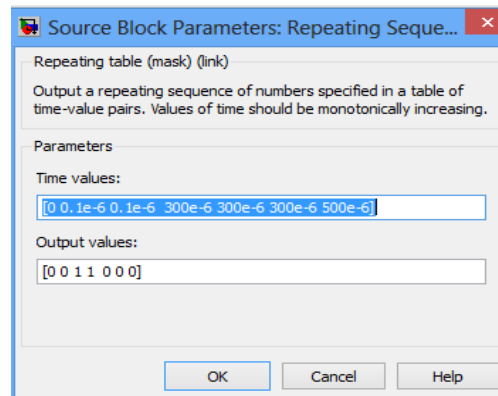
الشكل (3-42) واجهة المكتبة Power Electronics لادخال محددات القاطع IGBT2

مع العلم أن دائرة المولد النبضي البرقي توصيلة B تحتاج إلى قاطعين، الأول IGBT2 يقوم بشحن المكثف CS ويقوم الثاني IGBT1 بتفريغ هذه المكثف لشحن المكثف CB عبر المقاومة Rd، خلال أزمنة محددة، وذلك عند تطبيق نبضة القدح الملائمة من دائرة توليد النبضات التي يتم اختيارها من المكتبة الفرعية Repeating Sequence2، نختار هذا العنصر من المكتبة Simulink، كما هو مبين في الشكل (3-43).



الشكل (3-43) واجهة المكتبة Simulink لاختيار دارة توليد النبضات

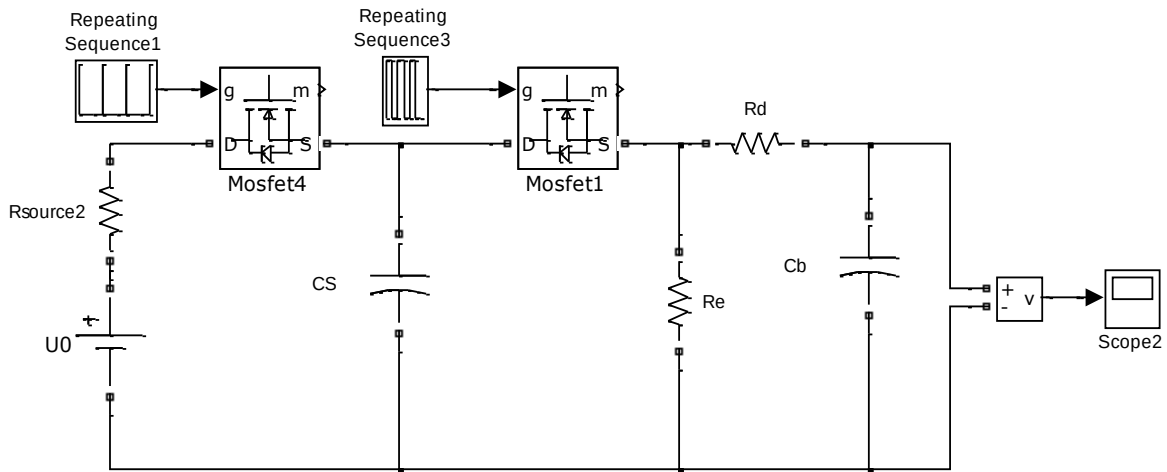
ثم ندخل محددات هذا العنصر كما هو مبين في الشكل (3-44).



الشكل (3-44) واجهة المكتبة الفرعية Pulse Generator لاختيار محددات دارة توليد النبضات

من خلال هذا العنصر يتم التحكم بأزمة فصل ووصل القواطع الإلكترونية، أي بأزمة موجة التوتر النبضي البرقي الناتج، ولإظهار موجة الخرج الناتجة من عملية النمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B نحتاج أيضاً إلى مقياس فولط لقياس توتر الخرج، و راسم إشارة لإظهار موجة الخرج، ويتم

اختيار هذه العناصر من مكتبة measurement, sinks، ويبين الشكل (3-45) دائرة النمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B وذلك من خلال **simpowersys**

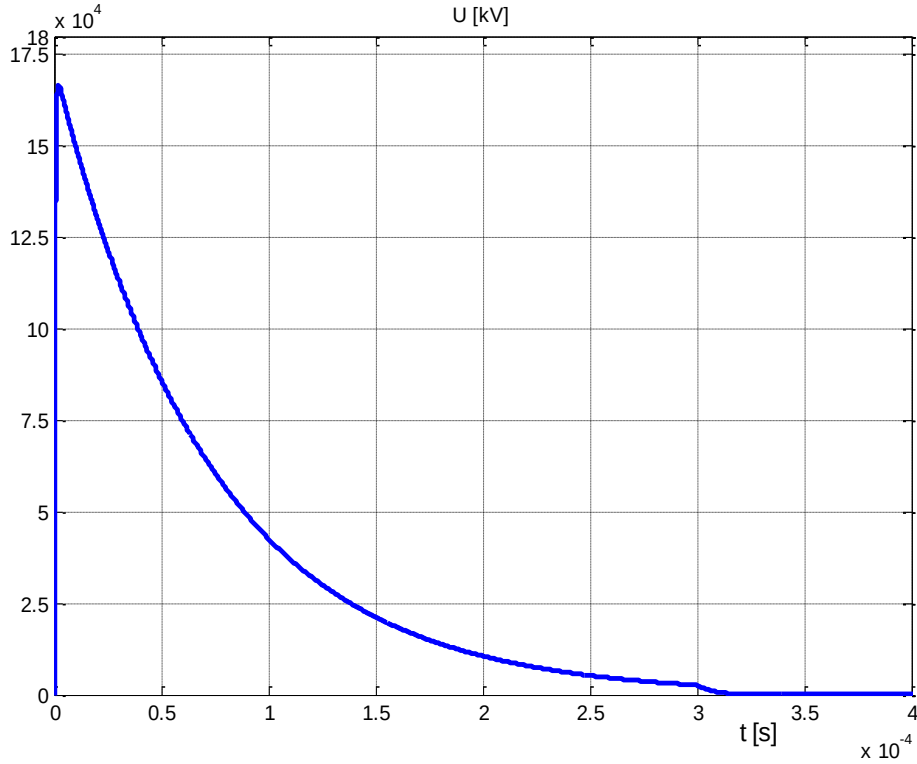


الشكل (3-45) دائرة النمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B

وبإدخال القيم العملية لعناصر المولد النبضي الموجود في المخبر إلى دائرة النمذجة وهي:

U0(kV)	100
Cs (pF)	5000
CB (pF)	600
Rd(Ω)	750
Re(Ω)	12200

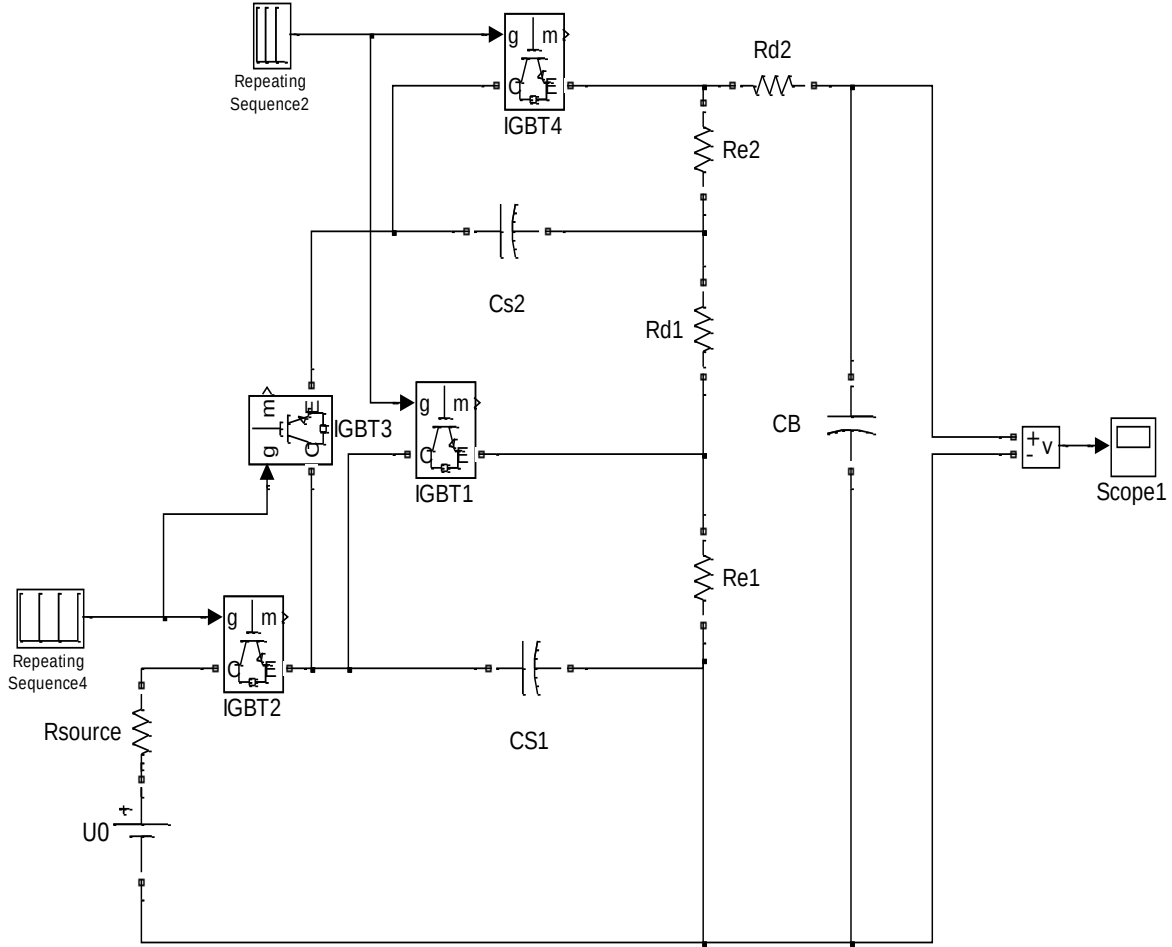
نحصل من راسم الاشارة على شكل موجة الخرج المبينة بالشكل (3-46):



الشكل (3-46) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلة واحدة.

من خلال هذه الموجة يمكن أن نحسب كلاً من زمن الجبهة T_s ، و زمن نصف الظهر T_r وقد حصلنا على النتائج التالية: $T_s = 1.2 \mu s, T_r = 50 \mu s$ ، وهي قيم موجة البرق المعيارية.

ويبين الشكل (3-47) دارة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين حيث لا يتغير مبدأ عمل المولد النبضي متعدد المراحل عن المولد السابق، حيث تم شحن المكثفات بشكل تفرعي عن طريق إغلاق القواطع الالكترونية IGBT1 و IGBT2 وذلك بإعطائها نبضة القدرح الملائمة، وبعد ذلك تحجز هذه القواطع وتطبق نبضة القدرح على القواطع الالكترونية IGBT3 و IGBT4 ليتم تفريغ المكثف Cs وشحن CB عبر مقاومات الشحن R_{d1} و R_{d2} . بعد ذلك يتم حجز هذه القواطع ليتم تفريغ CB عبر مقاومات التفريغ $R_{d1}+R_{e1}$ و $R_{d2}+R_{e2}$ لنحصل بعد ذلك على موجة الخرج وهي موجة البرق المعيارية:

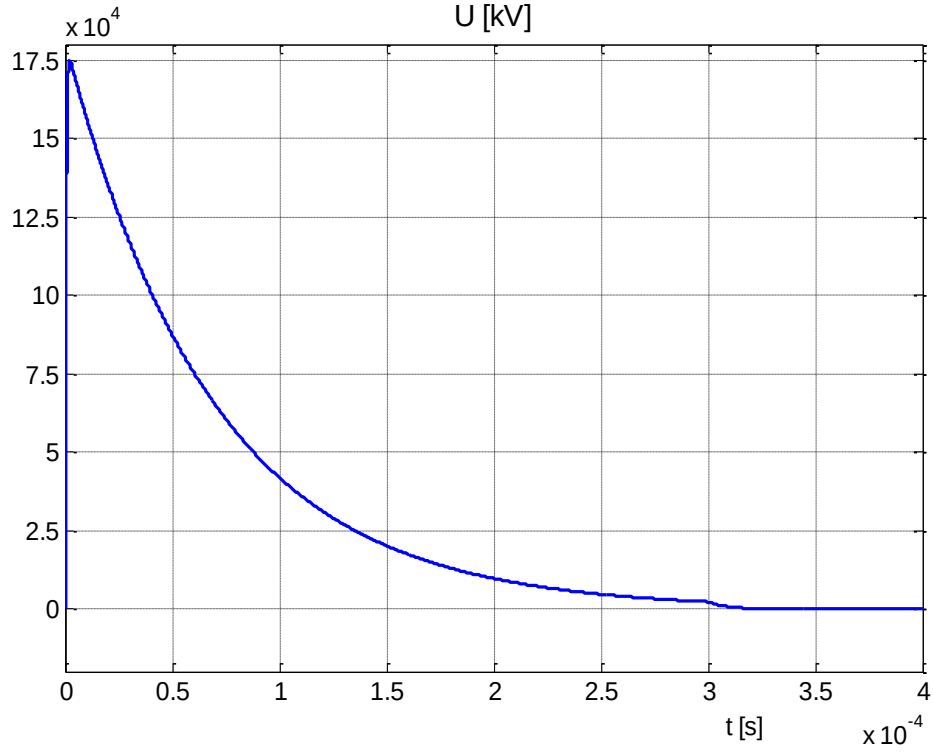


الشكل (3-47) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين

بإدخال القيم العملية لعناصر المولد النبضي الموجود في المخبر إلى دائرة النمذجة وهي:

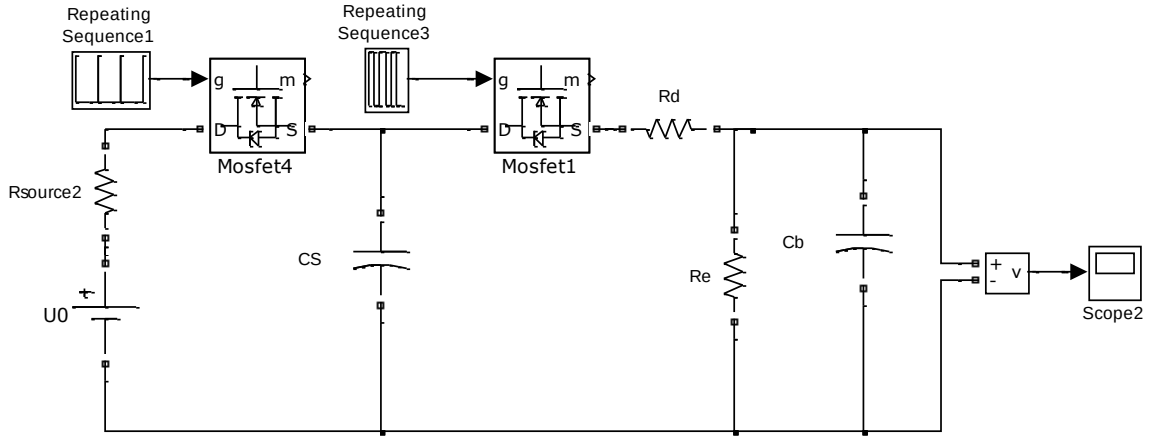
U0(kV)	100
Cs (pF) لكل مرحلة	10000
CB (pF) لكل مرحلة	1200
Rd(Ω) لكل مرحلة	375
Re(Ω) لكل مرحلة	6100

نحصل من راسم الإشارة على شكل موجة الخرج المبينة بالشكل (3-48):



الشكل (3-48) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين

يبين الشكل (3-49) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A وهي تشابه تماماً دائرة مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B :

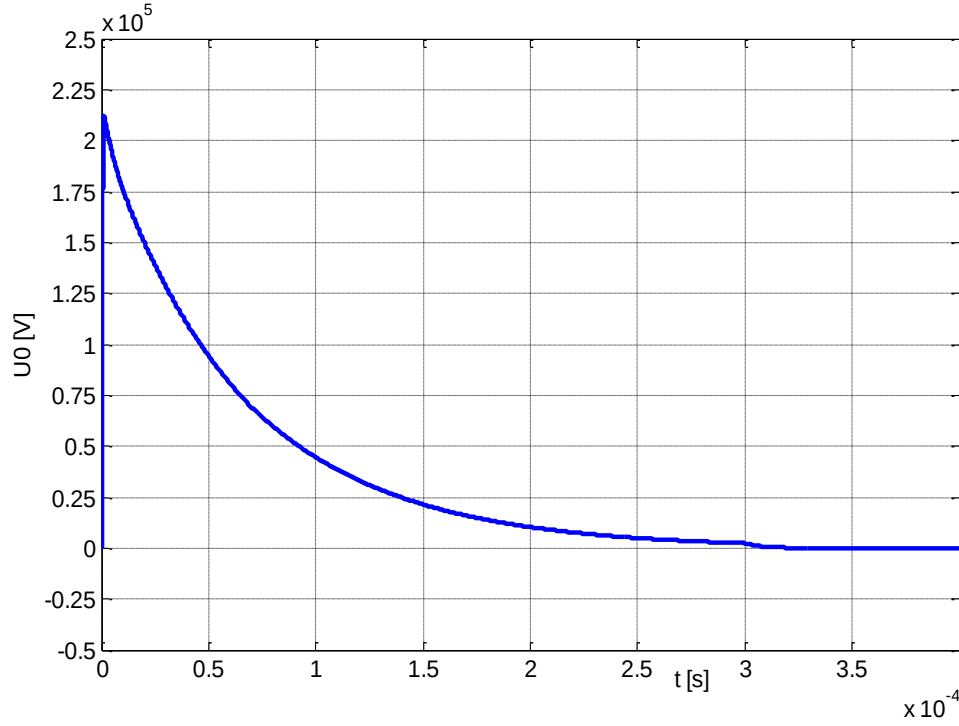


الشكل (3-49) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A

بإدخال القيم العملية لعناصر المولد النبضي الموجود في المخبر إلى دائرة النمذجة وهي:

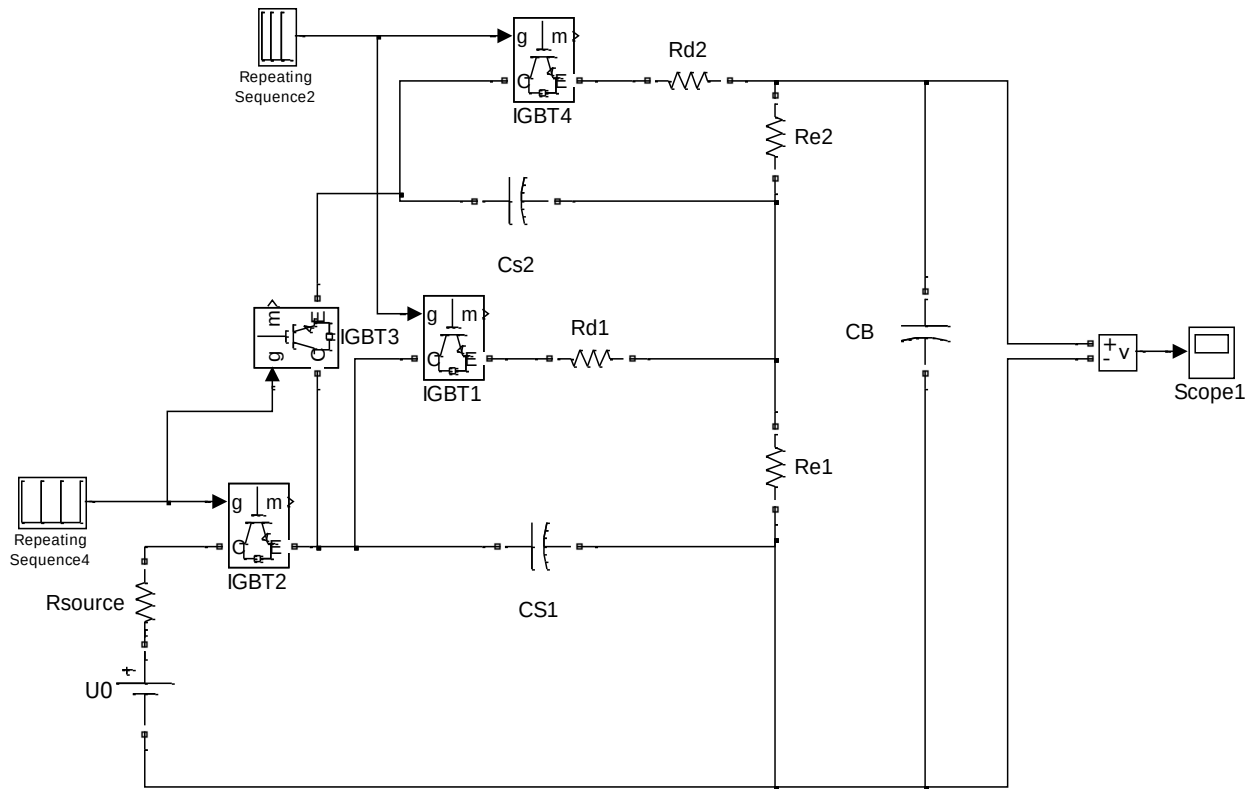
UO(kV)	100
Cs (pF)	5000
CB (pF)	600
Rd(Ω)	750
Re(Ω)	12200

نحصل من راسم الإشارة على شكل موجة الخرج المبينة بالشكل (3-50):



الشكل (3-50) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة

يبين الشكل (3-51) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلتين:

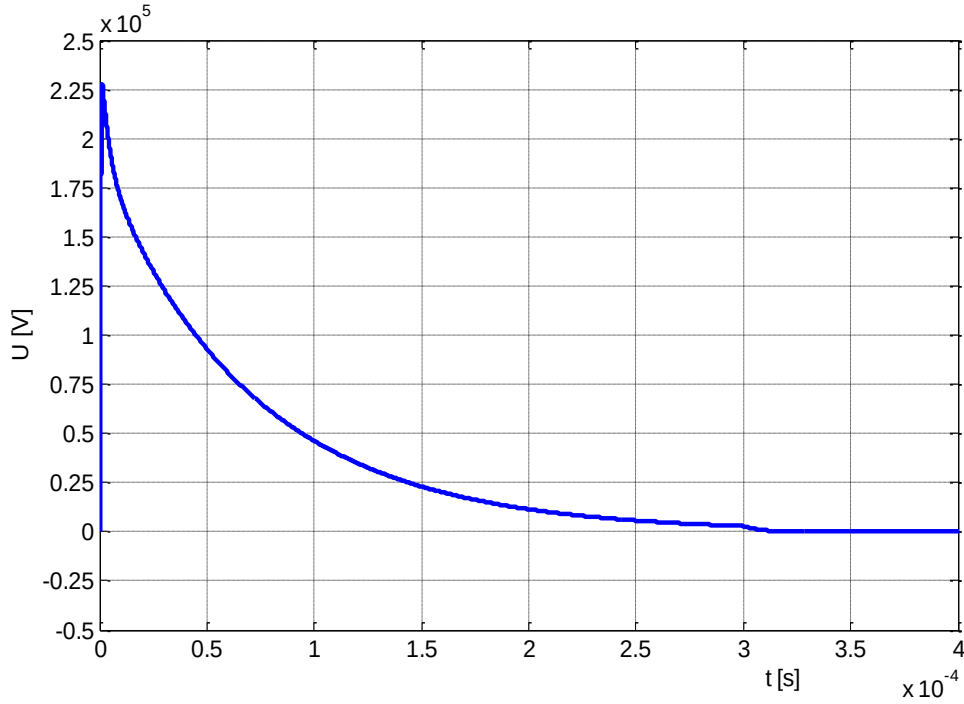


الشكل (3-51) دائرة نمذجة لمولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلتين

بإدخال القيم العملية لعناصر المولد النبضي الموجود في المخبر إلى دائرة النمذجة وهي:

U0(kV)	100
Cs (pF) لكل مرحلة	10000
CB (pF) لكل مرحلة	1200
Rd(Ω) لكل مرحلة	375
Re(Ω) لكل مرحلة	6100

نحصل من راسم الإشارة على شكل موجة الخرج المبينة بالشكل (3-52):



الشكل (3-52) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلتين

نلاحظ من الشكل السابق أن زمن الجبهة وزمن مصف الظهر هي $T_s = 1.2 \mu s$, $T_r = 50 \mu s$, وهي قيم موجة البرق المعيارية.

3-5: نمذجة المولد النبضي باستخدام بيئة Matlab-Simulink:

تعريف مكتبة Simulink:

هي عبارة عن منهج برمجي نستطيع بواسطته نمذجة، ومحاكاة وتحليل الأنظمة الديناميكية سواء الخطية وبزمن مستمر أو متقطع، ولتسهيل النمذجة توفر الأداة Simulink إمكانية البرمجة البيانية الصندوقية باستخدام الفأرة وبناء التوابع المناسبة، والوصول للبرمجة ومخطط يعبر عن المسألة المطروحة، ويمكن أخذ تلك الصناديق من مكتبات الأداة Simulink الواسعة والشاملة لكل النماذج الممكنة، سواء مكتبة المصادر أو مكتبة الخرج أو الكتل المعبرة عن الحالات الخطية واللاخطية، أو أدوات الوصل بين تلك الكتل. كما نستطيع صياغة وبناء الكتل الخاصة بنا، ونستطيع الولوج إلى داخل الكتلة بالنقر عليها نقراً مزدوجاً فتصبح بمستوى برمجي أعمق، وهكذا يمكننا التنقل ضمن مستويات مختلفة تعبر عن هيكليّة المسألة المطروحة بشكل واضح.

بعد الانتهاء من البناء الصندوقي يمكن إجراء المحاكاة عن طريق التكامل وبطرائق مختلفة، كما ويمكن إظهار النتائج ومراقبتها في أثناء المكاملة باستخدام صناديق الخرج (وحدات الخرج مثلاً scope وغيرها)، والتي تؤمن خيارات كثيرة وطرقاً عديدة لإخراج وإظهار النتائج أو إرسالها لملف أو تخزينها.

3-5-1: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B ذو مرحلة واحدة:

من أجل نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B سنقوم بقسم الدارة إلى جزئين:

1-دائرة شحن المكثف Cs:

وتعطى بالمعادلات التفاضلية التالية:

$$V_{Cs} = \frac{1}{Cs} \int i_c . dt \Rightarrow i_c = \frac{U - V_{cs}}{Rsource}$$

حيث:

Vcs: توتر شحن Cs

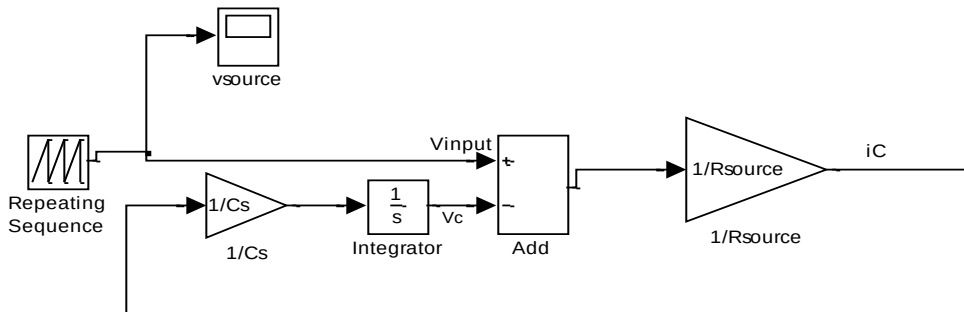
ic: تيار شحن Cs.

Rsource: مقاومة المنبع.

U: توتر المنبع.

ويتم نمذجتها في بيئة الماتلاب باستخدام عناصر تكامل ومجموعة من الثوابت تعتمد قيمها على عناصر دائرة المولد النبضي. وللحصول على نبضات شحن نستخدم العنصر (repeating sequence) كمنبع التوتر المستمر العالي.

والشكل (3-53) يبين نمذجة هذا القسم:



الشكل (3-53) نمذجة دائرة شحن Cs

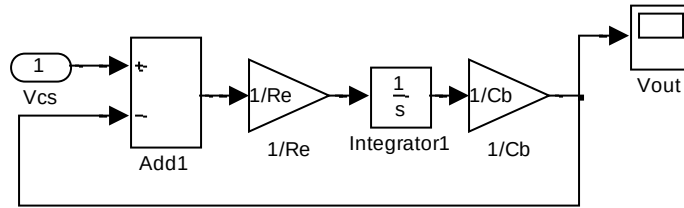
2- تفريغ المكثف Cs:

وتعطى بالمعادلات التفاضلية التالية:

$$\frac{V_{Cs} - V_{out}}{R_e} = C_b \frac{dV_{out}}{dt} \Rightarrow$$

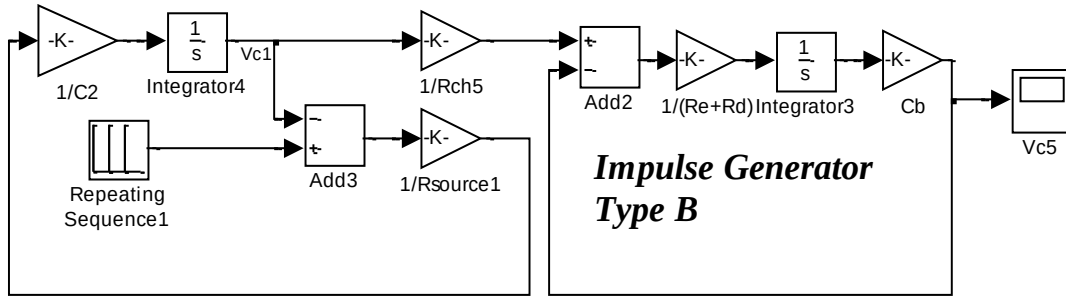
$$V_{out} = \frac{1}{C_b} \int \frac{V_{Cs} - V_{out}}{R_e} dt$$

حيث: V_{out} : التوتر النبضي الناتج. والشكل (3-54) يبين نمذجة هذا القسم:



الشكل (3-54) نمذجة دارة تفريغ Cs

والشكل (3-55) يبين الدارة الكاملة لنمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B :

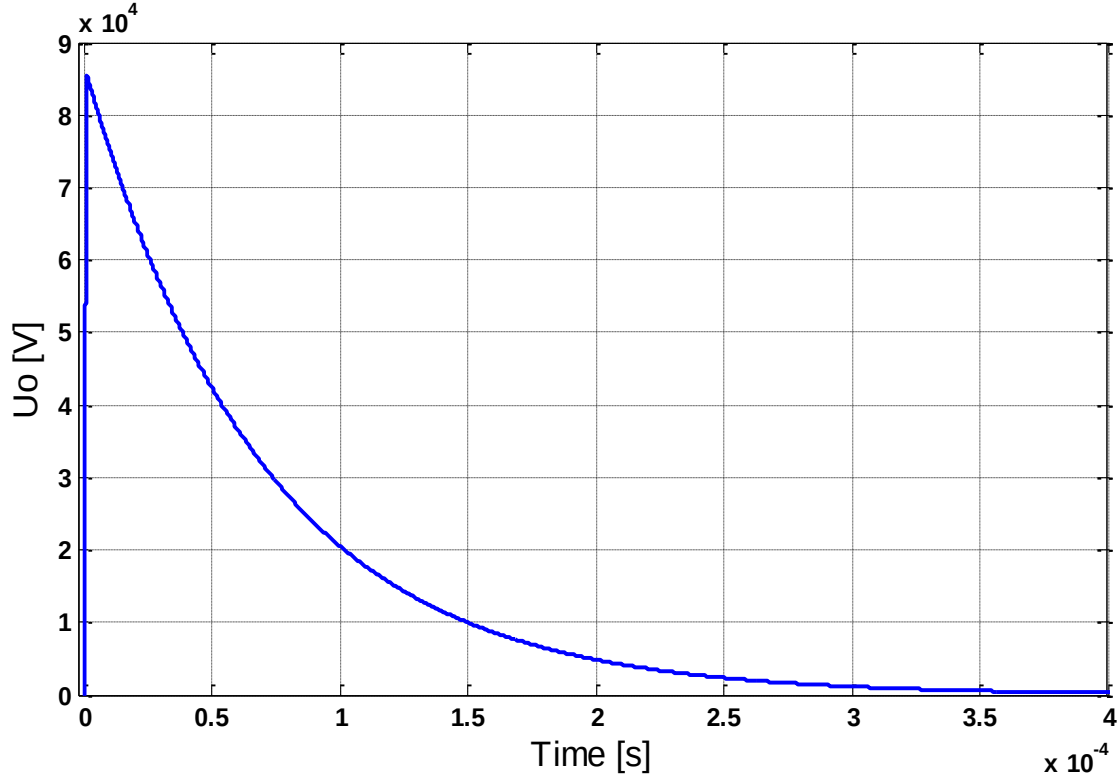


الشكل (3-55) نمذجة دارة مولد نبضي برفي توصيلة B مرحلة واحدة

وبإدخال قيم المولد النبضي توصيلة B مرحلة واحدة ذو المواصفات التالية:

UO(kV)	100
Cs (pF)	5000
CB (pF)	600
Rd(Ω)	750
Re(Ω)	12200

نحصل على موجة التوتر المبينة في الشكل (3-56).

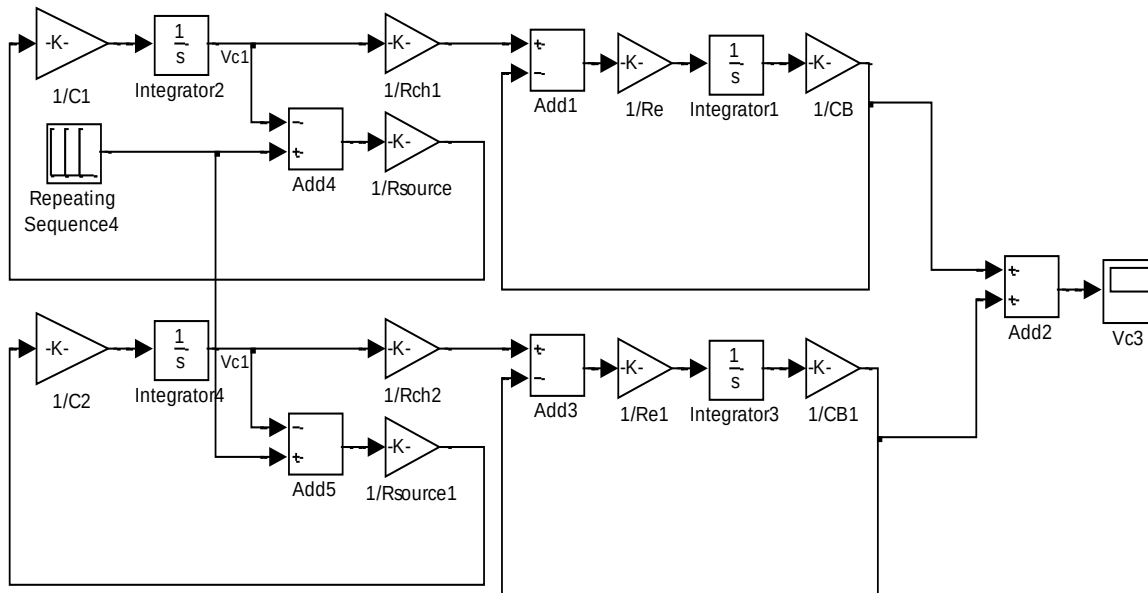


الشكل (3-56) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلة واحدة

وبحساب الأزمنة العائدة لهذه الموجة (موجة البرق الناتج) نحصل على : $T_s = 1.2 \mu s$, $T_r = 50 \mu s$

3-5-2: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B ذو مرحلتين:

إن دارة النمذجة في هذه الحالة هي عبارة عن جمع دارتين ذو مرحلة واحدة ويكون التوتر النبضي الحاصل هو جمع للتوترات النبضية لكل مرحلة. والدارة التالية تبين مخطط نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة B ذو مرحلتين.

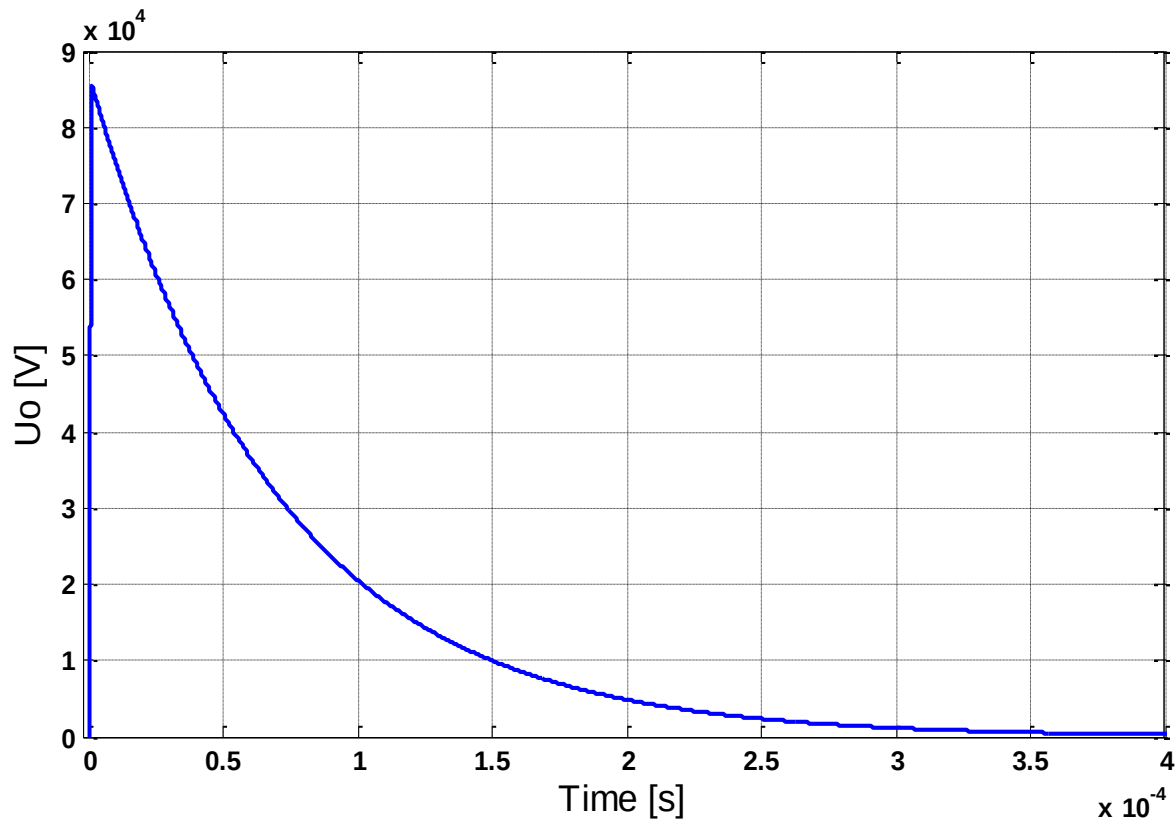


الشكل (3-57) دائرة نمذجة مولد توتر نبضي توصيلة B مرحلتين

وبإدخال قيم المولد النبضي توصيلة B مرحلتين ذو المواصفات التالية:

UO(kV)	100
Cs (pF) لكل مرحلة	10000
CB (pF) لكل مرحلة	1200
Rd(Ω) لكل مرحلة	375
Re(Ω) لكل مرحلة	6100

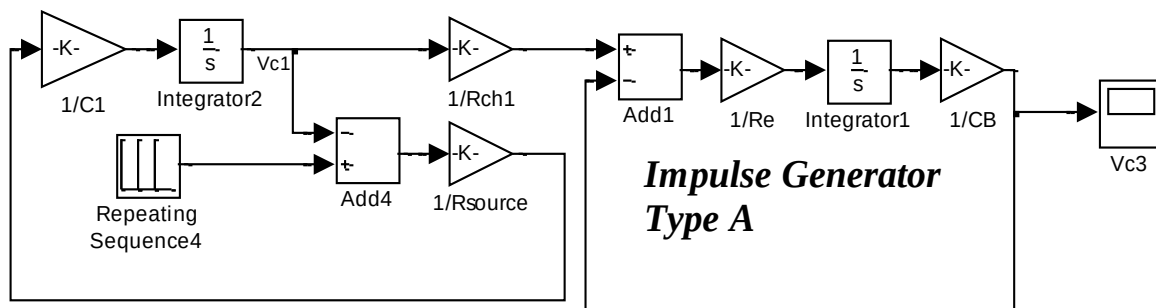
نحصل على موجة التوتر المبينة في الشكل (3-58).



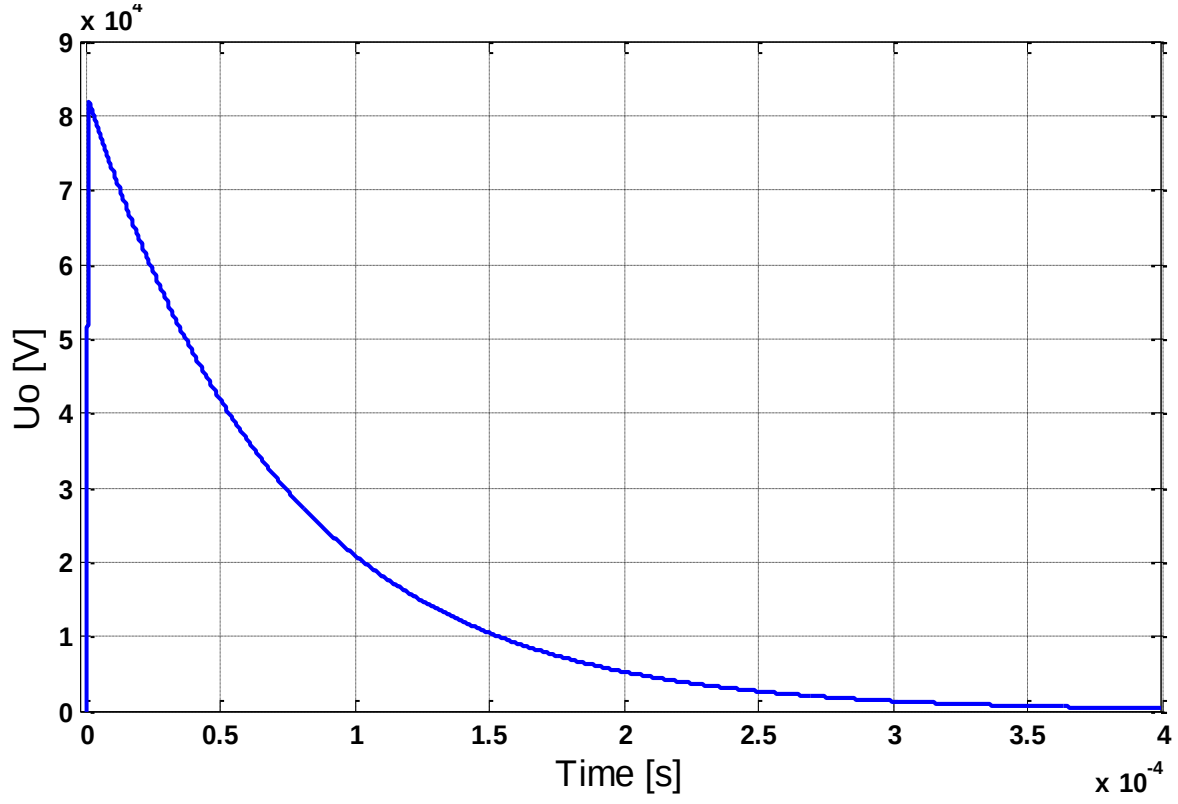
الشكل (3-58) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة B مرحلتين

3-5-3: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة A ذو مرحلة واحدة:

وبنفس الطريقة بالنسبة للمولد النبضي البرقي توصيلة A، حيث يبين الشكل (3-59) دائرة نمذجة مولد وحيد المرحلة. ويبين الشكل (3-60) موجة الخرج الناتجة عن عملية النمذجة.



الشكل (3-59) دائرة نمذجة مولد نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة

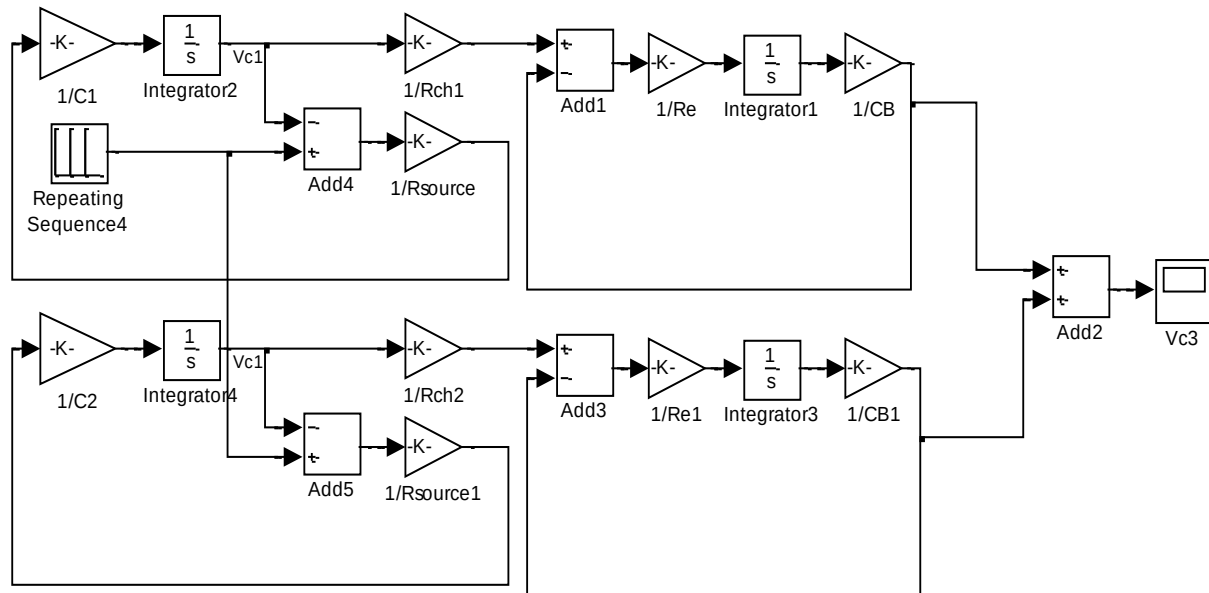


الشكل (3-60) خرج مولد توتر عالي نبضي برقي توصيلة A مرحلة واحدة

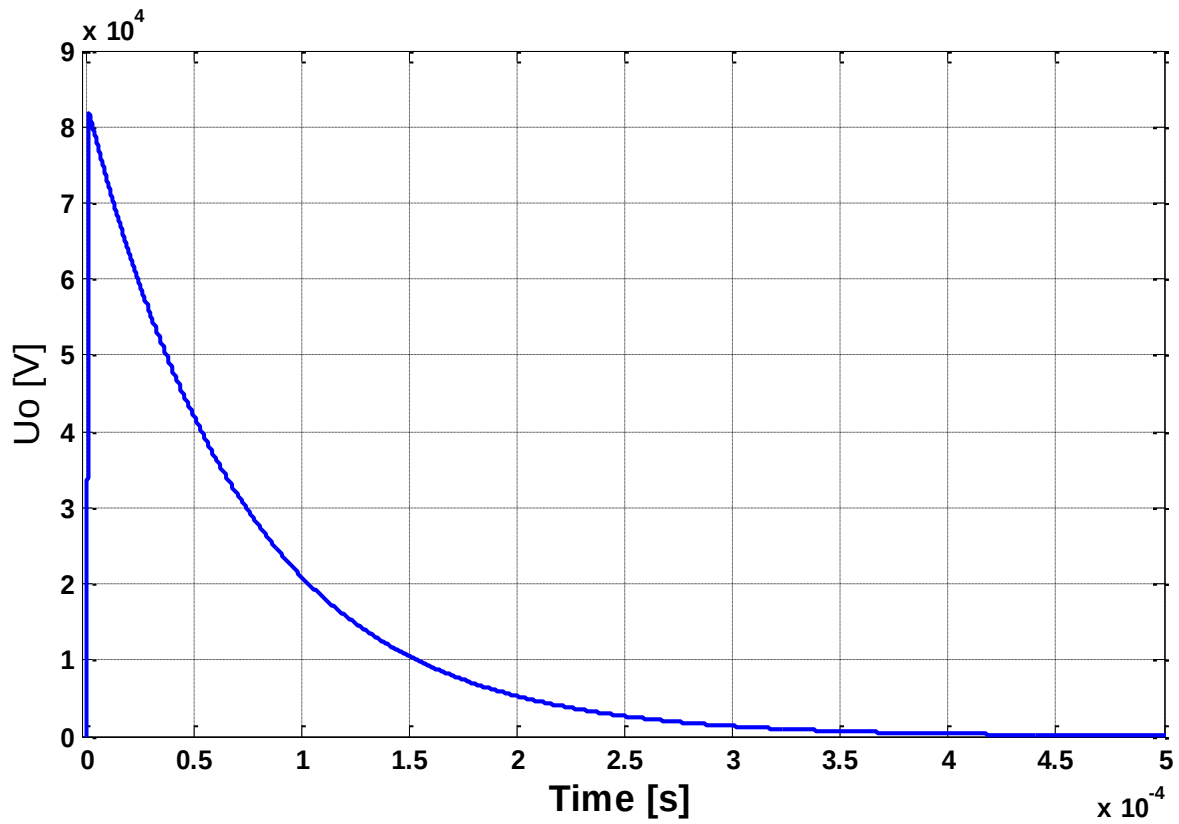
3-5-4: نمذجة المولد النبضي ذو التوصيلة A ذو مرحلتين:

ويبين المخطط الموضح في الشكل (3-61) نمذجة مولد نبضي برقي مرحلتين توصيلة A. ويبين الشكل

(3-62) موجة الخرج الناتجة عن عملية النمذجة عند ادخال القيم العملية لدارة النمذجة.



الشكل (3-61) دائرة نمذجة مولد توتر نبضي توصيلة A مرحلتين



الشكل (3-62) خرج مولد توتر نبضي برقي توصيلة A مرحلتين

من خلال نتائج البرنامج و النمذجة التي تمت نلاحظ مايلي:

- (1) إمكانية حساب كل من زمن الجبهة Ts وزمن نصف الظهر Tr والمردود وذلك لكلا التوصيلتين A.B بالبرنامج وكذلك بالنسبة لطرق النمذجة المختلفة.
- (2) إمكانية إظهار شكل موجة التوتر النبضي الناتج ومقارنة النتائج التي يمكن الحصول عليها من خلال موجة الخرج بالطرق الثلاث مع القيم المحسوبة رياضيا للتأكد من تطابق وصحة عمل النمذجة.
- (3) إمكانية تغيير عناصر المولد وذلك عن طريق إدخال القيم وتغييرها من واجهة البرنامج المصممة أو من خلال دارات النمذجة المختلفة واثّر ذلك على شكل الموجة وعلى مميزات الموجة النبضية وذلك للتأكد من صحة المعادلات والإجراءات المتخذة وقد أجريت مقارنة للنتائج بين الطريقة الحسابية والمخبرية مع نتائج النمذجة وقد أظهرت النتائج مطابقة كبيرة.

النتائج والتوصيات

النتائج والتوصيات

تعد البرمجيات في الوقت الحاضر من الوسائل المهمة في المجالات العلمية ولأسيما الهندسية منها حيث يستطيع المهندس والباحث الحصول على نتائج دقيقة إضافية إلى توفير الوقت وأحيانا يمكنه الاستغناء عن النماذج الفيزيائية اللازمة لإجراء التجارب والاختبارات وقد استطعنا من خلال هذه الدراسة التوصل إلى النقاط التالية:

- 1) من خلال البرنامج الحاسوبي GUI تمكنا من حساب كل من T_s , T_r , n ورسم شكل موجة الخرج الناتجة لمولد نبضي برقي توصيلة A أو B ومقارنة النتائج مع النتائج الحاسوبية والمخبرية وقد أظهرت النتائج مطابقة كبيرة بينهما، كما يمكننا البرنامج من إمكانية تغيير عناصر المولد النبضي وذلك للحصول على المحددات المرغوب فيها.
- 2) استطعنا من خلال دارات النمذجة بواسطة Simulink simpowersys استخدام دارة النمذجة للمولد النبضي البرقي العلمي الموجود في مخابر هندسة التوتر العالي بجامعة دمشق وتحديد الأزمنة الجبهية ونصف الظهر عند تغيير عناصر المولد وأثر ذلك على شكل موجة الخرج.

النتيجة:

تمكنا من خلال هذه الدراسة إنشاء نموذج لمولد نبضي يحاكي المولد النبضي الفعلي عن طرق نمذجة دارة مولد نبضي للتوصيلتين A أو B بمرحلة واحدة أو متعدد المراحل و يمكن من خلالها توليد توتر نبضي برقي قريب من الذي نحصل عليه من المولد الفعلي بالإضافة إلى إمكانية معرفة أثر تغيير كل عنصر من عناصر المولد على شكل موجة الخرج وذلك بعدة طرق، ويبقى البحث العلمي مستمر في حالة وجود تساؤلات يتجاوب عليها مستقبلا في أبحاث أخرى.

- [1] Simulation of Impulse Voltage Generator and Impulse Testing of Insulator using MATLAB Simulink. Ramleth Sheeba¹, Madhavan Jayaraju², Thangal Kunju Nediyazhikam Shanavas³
- [2] Design of impulse generators for different front and Tail Resistors in Impulse voltage testing of power transformers Preeti Nair, Prof. Arun Pachori
- [3] Impulse Generator and Lightning Characteristics Simulation using Orcad PSpice Software Muhammad Saufi Kamarudin, Erwan Sulaiman, Md Zarafi Ahmad, Shamsul Aizam Zulkifli and Ainul Faiza Othman.
- [4] Simulation and Impulse testing of Power Transformers at different values of inductive load by using PSpice software. Preeti Nair, Prof. Arun Pachori
- [5] Determining impulse generator settings for various test cases with the help of a www-based simulation program. Wolfgang Schufft, Wolfgang Hauschild, Ralf Pietsch.
- [6] AN IMPULSE GENERATOR SIMULATION CIRCUIT University of Pittsburgh 2013.
- [7] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering *Fundamentals*", *Second edition*, Canada 2005.

- [8] د. محمد رسلان زهيرة_جامعة تشرين_هندسة التوتر العالي (1)_2010\2011
- [9] د. محمّد نضال الرئيس + د. محمد رسلان زهيرة_الحماية من الصواعق_2003
- [10] د. محمد رسلان زهيرة_جامعة تشرين_هندسة التوتر العالي (2)_2005\2006
- [11] د. إحسان الفهد، جامعة دمشق، هندسة التوتر العالي (2) -2001\2002

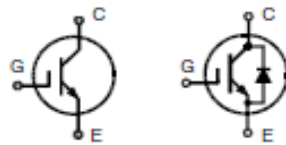
الملحق: معطيات بعض القواطع الإلكترونية

High Voltage IGBT with optional Diode

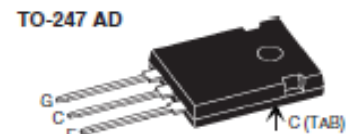
IXDH 20N120
IXDH 20N120 D1

$$\begin{aligned} V_{CES} &= 1200 \text{ V} \\ I_{C25} &= 38 \text{ A} \\ V_{CE(sat) \text{ typ}} &= 2.4 \text{ V} \end{aligned}$$

Short Circuit SOA Capability
Square RBSOA



IXDH 20N120 IXDH 20N120 D1



G = Gate,
C = Collector,
E = Emitter
TAB = Collector

Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
V_{CES}	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	1200	V
V_{CER}	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to 150°C ; $R_{GE} = 20 \text{ k}\Omega$	1200	V
V_{GES}	Continuous	± 20	V
V_{GEM}	Transient	± 30	V
I_{C25}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	38	A
I_{C90}	$T_C = 90^\circ\text{C}$	25	A
I_{CM}	$T_C = 90^\circ\text{C}$, $t_p = 1 \text{ ms}$	50	A
RBSOA	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$, $R_G = 82 \Omega$ Clamped inductive load, $L = 30 \mu\text{H}$	$I_{CM} = 35$ $V_{CEK} < V_{CES}$	A
t_{SC} (SCSOA)	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $V_{CE} = V_{CES}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$ $R_G = 82 \Omega$, non repetitive	10	μs
P_C	$T_C = 25^\circ\text{C}$	IGBT Diode	200 75 W W
T_J		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}		-40 ... +150	$^\circ\text{C}$
Maximum lead temperature for soldering 1.6 mm (0.062 in.) from case for 10 s		300	$^\circ\text{C}$
M_d	Mounting torque	0.8 - 1.2	Nm
Weight		6	g

Features

- NPT IGBT technology
- low saturation voltage
- low switching losses
- square RBSOA, no latch up
- high short circuit capability
- positive temperature coefficient for easy paralleling
- MOS input, voltage controlled
- optional ultra fast diode
- International standard package

Advantages

- Space savings
- High power density

Typical Applications

- AC motor speed control
- DC servo and robot drives
- DC choppers
- Uninterruptible power supplies (UPS)
- Switch-mode and resonant-mode power supplies

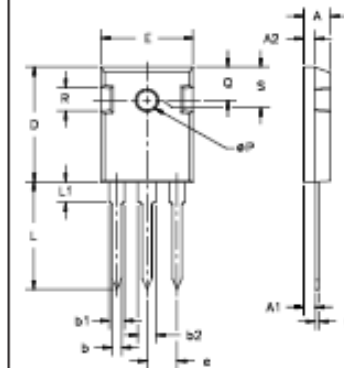
Symbol	Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$V_{(RM)CES}$	$V_{GE} = 0 \text{ V}$	1200		V
$V_{GS(th)}$	$I_C = 0.6 \text{ mA}$, $V_{CE} = V_{GE}$	4.5		6.5 V
I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$		2	1 mA mA
I_{GES}	$V_{CE} = 0 \text{ V}$, $V_{GE} = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 500 \text{ nA}$
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 20 \text{ A}$, $V_{GE} = 15 \text{ V}$		2.4	3 V

Symbol	Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
C_{iss}	$V_{CE} = 25\text{ V}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$		1000	pF
C_{oss}			150	pF
C_{res}			70	pF
Q_g	$I_G = 20\text{ A}$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, $V_{CE} = 0.5\text{ V}_{CES}$		70	nC
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_J = 125^\circ\text{C}$ $I_G = 20\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $V_{CE} = 600\text{ V}$, $R_G = 82\ \Omega$		100	ns
t_r			75	ns
$t_{d(off)}$			500	ns
t_f			70	ns
E_{on}			3.1	mJ
E_{off}			2.4	mJ
R_{thJC}	Package with heatsink compound			0.63 K/W
R_{thCH}			0.25	K/W

Reverse Diode (FRED) [D1 version only]

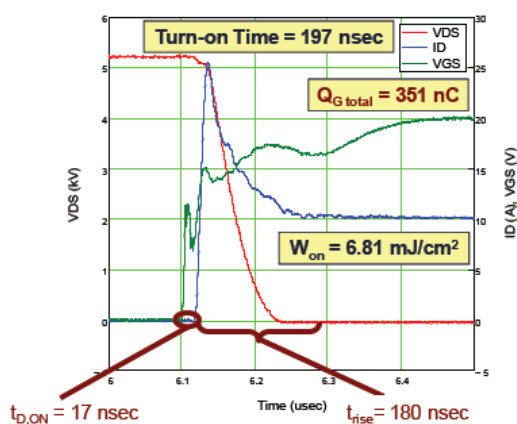
Symbol	Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
V_F	$I_F = 20\text{ A}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$ $I_F = 20\text{ A}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$	2.6 2.1		2.9 V V
I_F	$T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 90^\circ\text{C}$			31 A 19 A
I_{RM}	$I_F = 20\text{ A}$, $-di_F/dt = 400\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_R = 600\text{ V}$		15	A
t_{rr}	$V_{GE} = 0\text{ V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$		200	ns
t_{rr}	$I_F = 1\text{ A}$, $-di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_R = 30\text{ V}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$		40	ns
R_{thJC}				1.6 K/W

TO-247 AD Outline

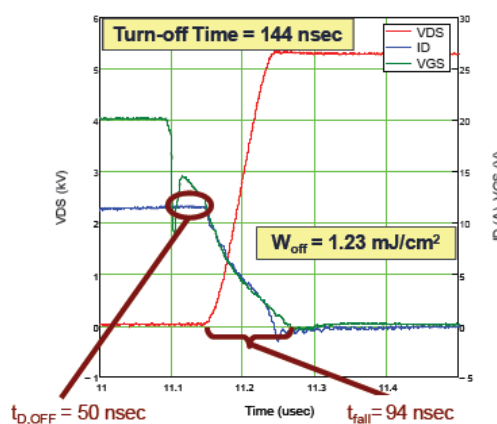


Dim.	Millimeter		Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	4.7	5.3	.185	.209
A ₁	2.2	2.54	.087	.102
A ₂	2.2	2.6	.059	.098
b	1.0	1.4	.040	.055
b ₁	1.65	2.13	.065	.084
b ₂	2.87	3.12	.113	.123
C	.4	.8	.016	.031
D	20.80	21.46	.819	.845
E	15.75	16.26	.610	.640
e	5.20	5.72	0.205	0.225
L	19.81	20.32	.780	.800
L1		4.50		.177
Q/P	3.55	3.65	.140	.144
Q	5.89	6.40	0.232	0.252
R	4.32	5.49	.170	.216
S	6.15	BSC	.242	BSC

10 kV/10 A SiC DMOSFET Clamped Inductive Switching



10 kV/10 A SiC DMOSFET
Turn-On Waveform



10 kV/10 A SiC DMOSFET
Turn-Off Waveform

Copyright © 2012, Cree, Inc.

pg. 14



Power Loss Comparison Between SiC 10 kV Switches and Si IGBTs



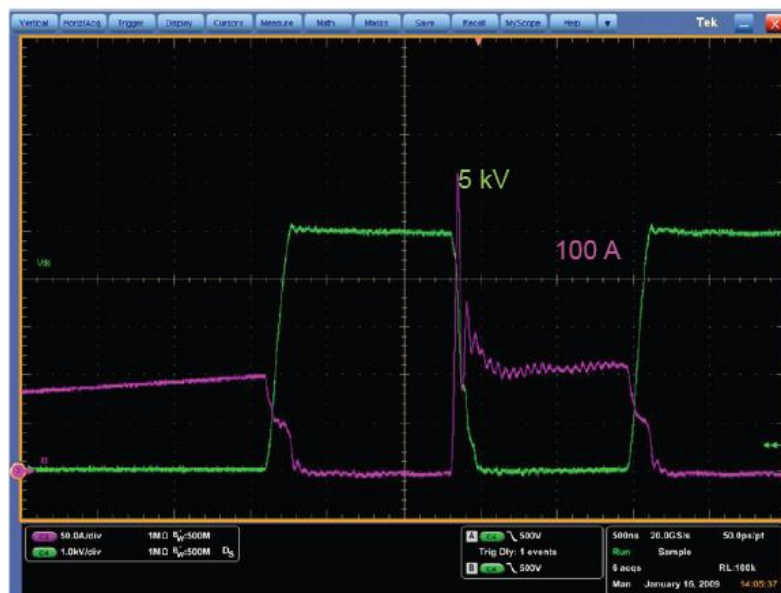
Device	BV (kV)	500 Hz 5 kV $P_{sw,sp}$ (W/cm ²)	5 kHz 5 kV $P_{sw,sp}$ (W/cm ²)	20 kHz 5 kV $P_{sw,sp}$ (W/cm ²)	33 A/cm ² 50% Duty 100°C $P_{cond,sp}$ (W/cm ²)
Cree SiC DMOSFET	10	4	40	160	100
Cree SiC n-IGBT	12	6.5	65	260	66
ABB Si IGBT 5SMX 12M6500	2x 6.5	72.5	725	2900	182

Copyright © 2012, Cree, Inc.

pg. 15



10 kV, 120 A SiC Half H-Bridge Module Switching Waveforms



OMEREX



imagination at work

CREE

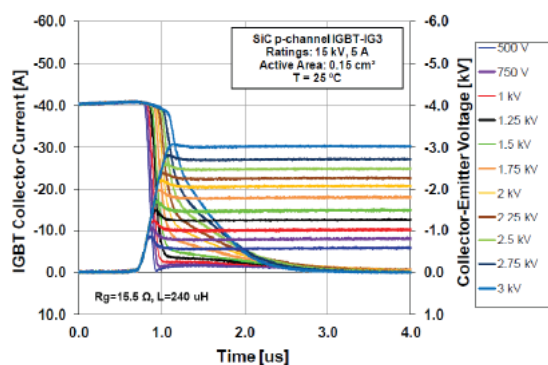
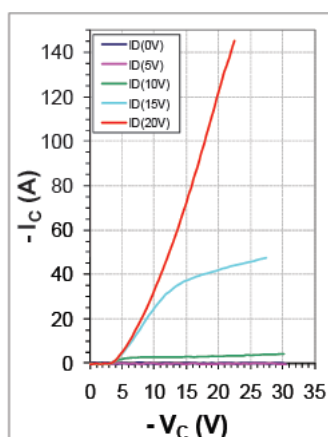
Copyright © 2008, Cree, Inc.

pg. 22

No Latch-Up Observed In 15kV/10A SiC p-IGBT

arpa-e

Dr. A. Hefner, NIST



No Static Latch-up @ $I_c = 145 \text{ A}$ @ 22.5 V
 $\Rightarrow$ Current density: 906 A/cm^2
 $\Rightarrow$ Power density: 45 kW/cm^2

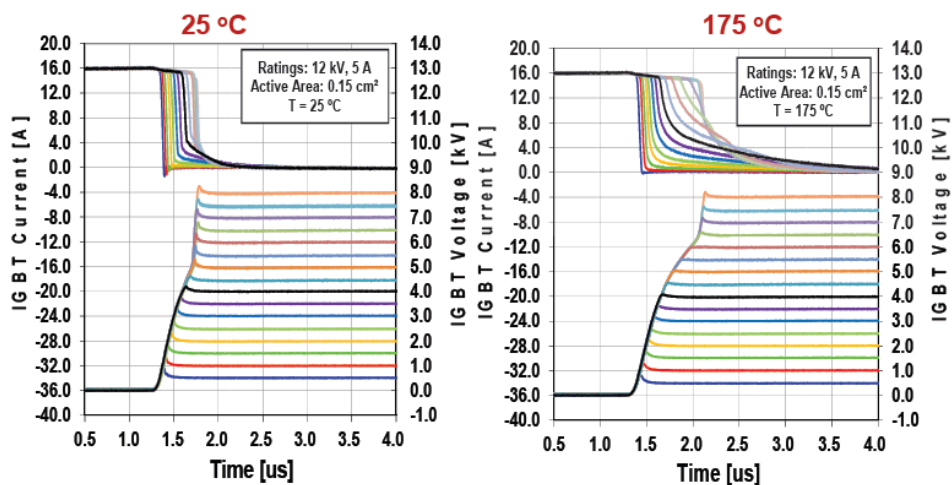
No Dynamic Latch-up
during turn-off transients:
 $I_c = -40 \text{ A}$

Copyright © 2012, Cree, Inc.

30

CREE

12.5kV SiC n-IGBT Turn-Off Switching Up to 8 kV at 25°C and 175°C



Measurements by Al Hefner at NIST

Copyright © 2012, Cree, Inc.



Abstract

Abstract

The international standards impose to carrying out tests with lightning impulse voltage to insulators and equipment, which are used in high voltage networks. The test will be done for all voltage (20, 66, 230, 400) kV with standard impulse waveform (amplitude, rise time, fall time, polarity and the number of impulses).

The impulse waveform properties changes in according with elements of the impulse generator circuit and the sample, to assure getting full impulse waveform compatible with IEC requirement, the generators must be designed in right way, when it's elements were calculated in the equivalent circuit (one stage or multistage), to define the capacitors and resistance for charging and discharging process.

When the impulse generator is designed, approximate mathematical equations are used, a laboratory test must be done to check the design. Nowadays, all researches tend to simulate the Marx generator circuit in both types (A-, B-type) in one stage or multiple stages, this will make the design process easier. Then comparison between laboratory-, calculation- and simulation results will be done, to determination whether the simulation is accessible or not.