

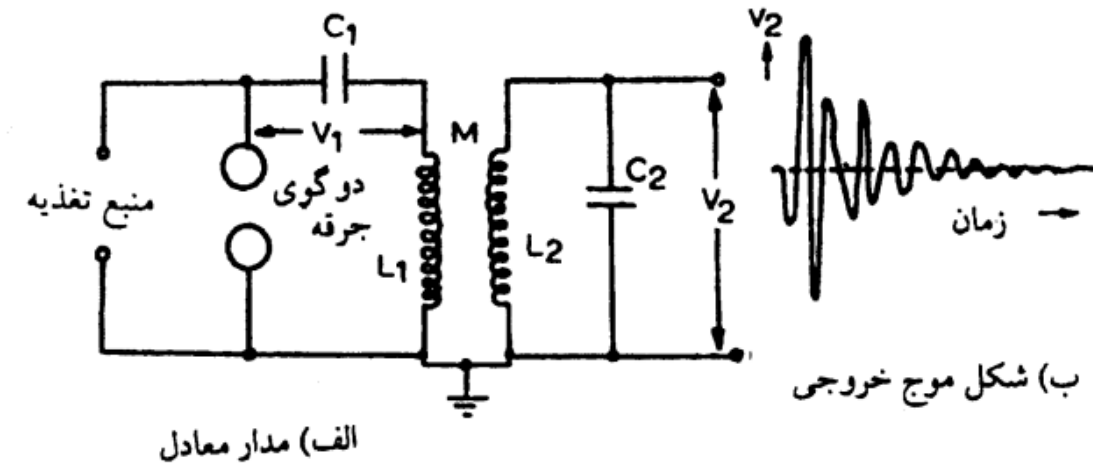
به نام خدا

عایق و فشار قوی

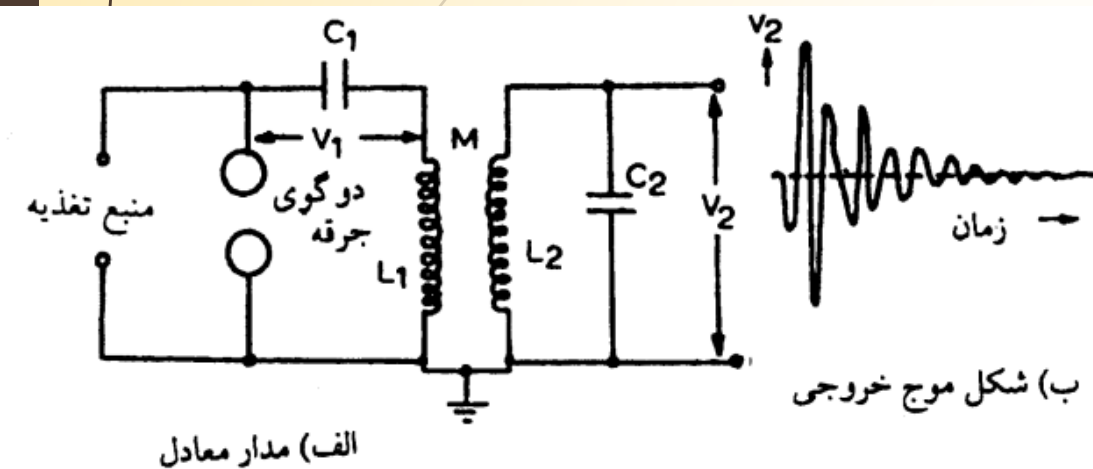
فصل پنجم تولید ولتاژهای فشارقوی

از ولتاژ فشار قوی با فرکانس زیاد، برای تغذیه چند برابر کننده‌های ولتاژ DC استفاده می‌شود. همچنین در آزمایش تجهیزات الکتریکی در برابر امواج کلیدزنی، ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا با فرکانس زیاد مورد نیاز هستند. معمول‌ترین ترانسفورماتور تشدید در فرکانس زیاد، سیم‌پیچ تسلا است. این مدار از دو مدار تشدید قابل تنظیم مطابق شکل (۸-۱۹) تشکیل می‌شود.

این مدار معمولاً برای ولتاژ اولیه حدود 10 kV و ولتاژ ثانویه از 500 تا 1000 kV ساخته می‌شود. سیم‌پیچ اولیه توسط یک منبع DC یا AC و از طریق خازن C_1 تغذیه می‌شود. یک فاصله هوایی G دو سر سیم‌پیچ اولیه قرار دارد که برای ولتاژ مطلوب V_1 تنظیم می‌شود. با تخلیه این فاصله هوایی، ولتاژ خودالقایی زیادی در L_1 به وجود می‌آید. سیم‌پیچ‌های اولیه L_1 و L_2 بر روی عایقی بدون هسته پیچیده می‌شوند و در روغن قرار می‌گیرند. فرکانس تشدید سیم‌پیچ‌ها با خازن C_1 و C_2 برای فرکانس‌های 10 تا 100 کیلوهرتز تنظیم می‌شود. ولتاژ خروجی V_2 تابعی از پارامترهای L_1 ، L_2 ، C_1 ، C_2 و اندوکتانس متقابل M است. معمولاً مقاومت سیم‌پیچ‌ها اندک است و تنها در میرا کردن نوسانات نقش دارد. با صرف نظر کردن از این مقاومت‌ها، می‌توان مدار را به سادگی تحلیل کرد. فرض کنید در هنگام تخلیه، فاصله هوایی به مقدار V_1 شارژ شده باشد و در این حال گذر جریان i_1 از اولیه (L_1) ، جریان i_2 را در L_2 و C_2 به وجود آورده است. آن‌گاه:



شکل (۸-۱۹): مدار معادل و شکل موج خروجی مدار سیم‌پیچ تسلا



شکل (۸-۱۹): مدار معادل و شکل موج خروجی مدار سیم پیچ تسلا

$$V_1 = \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (۳۰-۸)$$

$$0 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

تبدیل لاپلاس معادلات اخیر به صورت زیر است:

$$\frac{V_1}{S} = \left[L_1 S + \frac{1}{C_1 S} \right] I_1(s) + M S I_2 \quad (۳۱-۸)$$

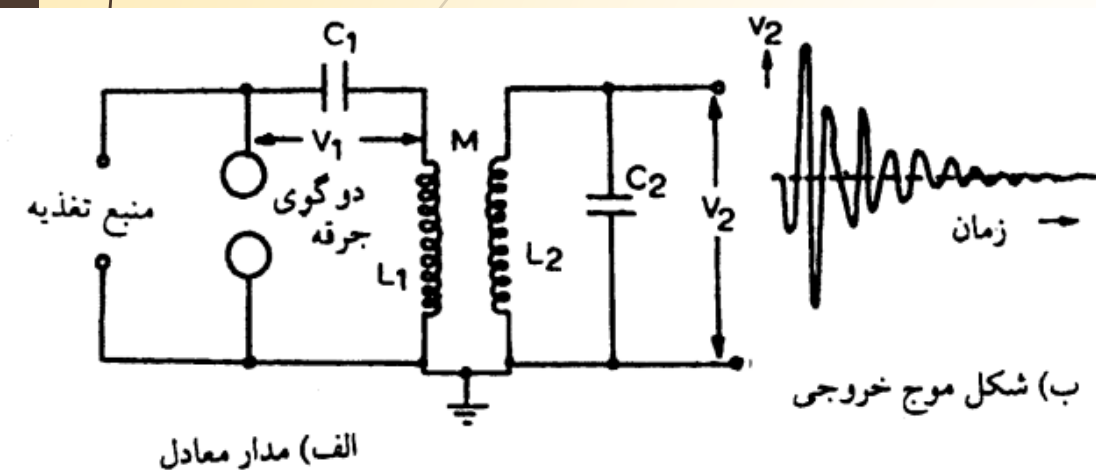
$$0 = \left[L_2 + \frac{1}{C_2 S} \right] I_2(s) + M S I_1$$

در این رابطه، $I_1(s)$ و $I_2(s)$ تبدیل لاپلاس i_1 و i_2 هستند. ولتاژ خروجی V_2 در دو سر خازن C_2 مدار آزمایش از:

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt$$

$$V_2(s) = \frac{I_2(s)}{C_2 S} \quad (۳۲-۸)$$

در این رابطه $V_2(s)$ تبدیل لاپلاس V_2 است. با حل V_2 از معادلات فوق داریم:



شکل (۸-۱۹): مدار معادل و شکل موج خروجی مدار سیم پیچ تسلا

در این رابطه $V_2(s)$ تبدیل لاپلاس V_2 است. با حل V_2 از معادلات فوق داریم:

$$V_2 = \frac{M V_1}{\sigma L_1 L_2 C_1} \cdot \frac{1}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} [\cos(\gamma_1 t) - \cos(\gamma_2 t)] \quad (۸-۳۳)$$

که،

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}} = \sqrt{1 - k^2}$$

k ضریب کوپلاژ L_1 ، L_2 است و،

$$\gamma_1, \gamma_2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \right]^2 - \omega_1^2 \omega_2^2 (1 - k^2)}$$

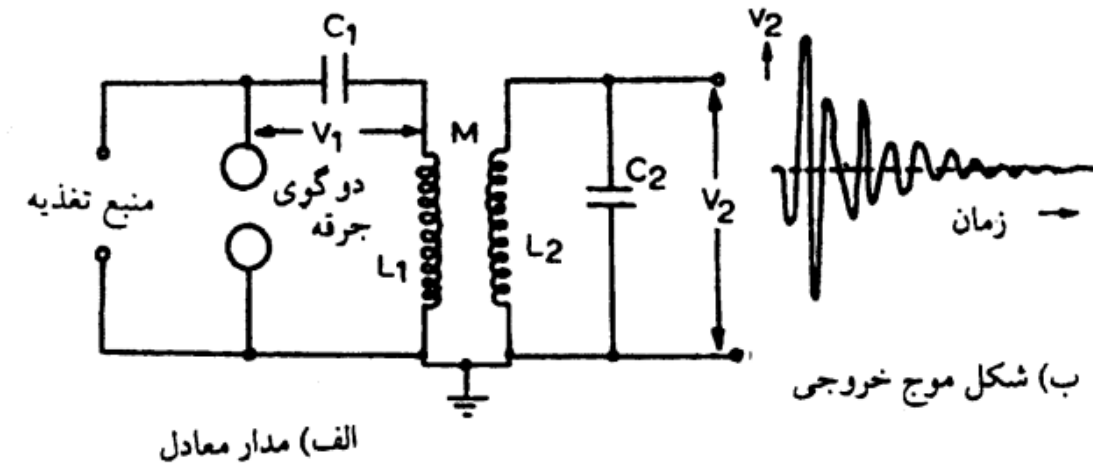
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

ولتاژ خروجی در شکل (۸-۱۹) نشان داده شده است. دامنه حداکثر ولتاژ ثانویه (V_2) را می توان به صورت زیر بیان کرد.

$$V_{2max} = V_1 e \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (۸-۳۴)$$

که،

$$e = \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a^2) - 4\sigma a}}, \quad a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}$$



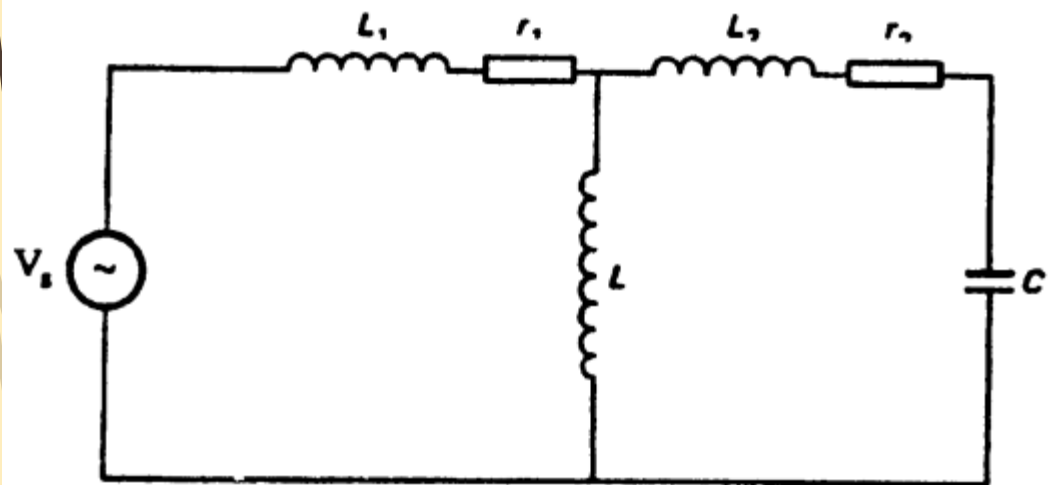
شکل (۸-۱۹): مدار معادل و شکل موج خروجی مدار سیم پیچ تسلا

مدار ارائه شده در شکل (۸-۱۹) را می توان به گونه ای ساده تر تحلیل کرد. انرژی ذخیره شده در مدار اولیه در خازن C_1 ، از طریق کوپلاژ مغناطیسی به C_2 منتقل می شود. اگر W_1 انرژی ذخیره شده در C_1 و W_2 انرژی ذخیره شده در C_2 و η بازده ترانسفورماتور باشد آنگاه:

$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 = \eta \left[\frac{1}{2} C_2 V_2^2 \right] \quad (۸-۳۵)$$

$$V_2 = \eta V_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (۸-۳۶)$$

می توان نشان داد که اگر ضریب کوپلاژ k بزرگ باشد، فرکانس نوسان کوچک خواهد بود و اگر مقدار مقاومت های سیم پیچ ها و k به اندازه کافی زیاد باشد، شکل موج به صورت یک پالس خواهد بود.



شکل (۸-۲۰): مدار معادل رزونانس، مدار تولید ولتاژ AC

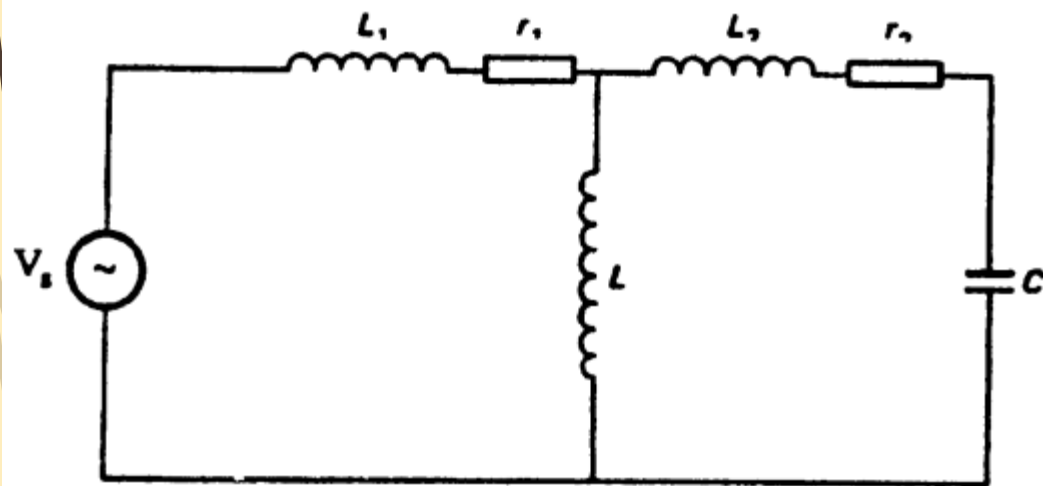
مدار رزونانس برای تولید ولتاژ فشار قوی AC

مدار معادل یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی یک مرحله‌ای برای تولید ولتاژ فشار قوی، شامل راکتانس‌های پراکندگی سیم‌پیچ‌های آن، مقاومت‌های سیم‌پیچ‌ها و راکتانس مغناطیس‌کنندگی و خازن شنت معادل با عایق نمونه تحت آزمایش می‌باشد. شکل (۸-۲۰) بیانگر مدار معادل این مولد می‌باشد.

اگر این مدار معادل در شرایطی به حالت یک مدار رزونانس سری درآید، آنگاه دامنه ولتاژ دو سر خازن C می‌تواند به سادگی به چندین برابر دامنه ولتاژ V_s (ولتاژ ورودی منتقل شده به ثانویه ترانسفورماتور) درآید. با صرف نظر کردن از راکتانس مغناطیس‌کنندگی (بدلیل جریان ناچیز آن) در شرایط رزونانس سری و سرعت زاویه‌ای ω منبع، داریم:

$$X_c = X_L$$

$$\omega(L_1 + L_2) = \frac{1}{\omega C} \quad (۸-۳۷)$$



شکل (۸-۲۰): مدار معادل رزونانس، مدار تولید ولتاژ AC

در این شرایط، جریان در عایق نمونه تحت آزمایش، بسیار زیاد می شود و تنها به وسیله مقاومت معادل مدار می تواند محدود شود. مقدار ولتاژ دو سر عایق نمونه (خازن C) برابر است با:

$$V_c = \left| \frac{-jV_s X_c}{R + j(X_L - X_c)} \right| = \frac{V_s}{R} X_c = \frac{V_s}{\omega R C}$$

در این حالت، ولتاژ دو سر عایق نمونه ممکن است به ۲۰ تا ۵۰ برابر ولتاژ فشار قوی ثانویه ترانسفورماتور برسد که مقدار آن، بستگی به ضریب کیفیت مدار دارد. این ضریب برابر است با:

$$Q = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega R C} \quad (۸-۳۸)$$

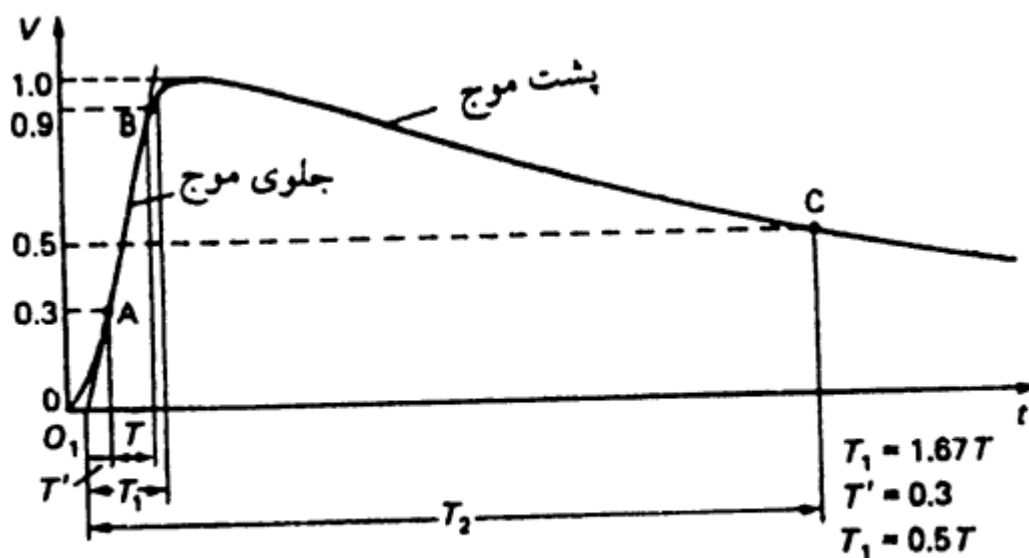
و ولتاژ دو سر عایق نمونه بر حسب کیفیت مدار برابر است با:

$$V_c = Q \cdot V_s \quad (۸-۳۹)$$

اگر ولتاژ مورد نیاز فشار قوی برای عایق نمونه V_c باشد و ضریب کیفیت مدار Q باشد، آنگاه ولتاژ منبع را باید به مقدار زیر تنظیم نمود:

$$V_s = \frac{V_c}{Q}$$

بنابراین، ولتاژ ورودی و KVA مورد نیاز به وسیله ضریب $\frac{1}{Q}$ تقلیل داده می شود.



شکل (۸-۲۳): شکل موج ولتاژ ضربه

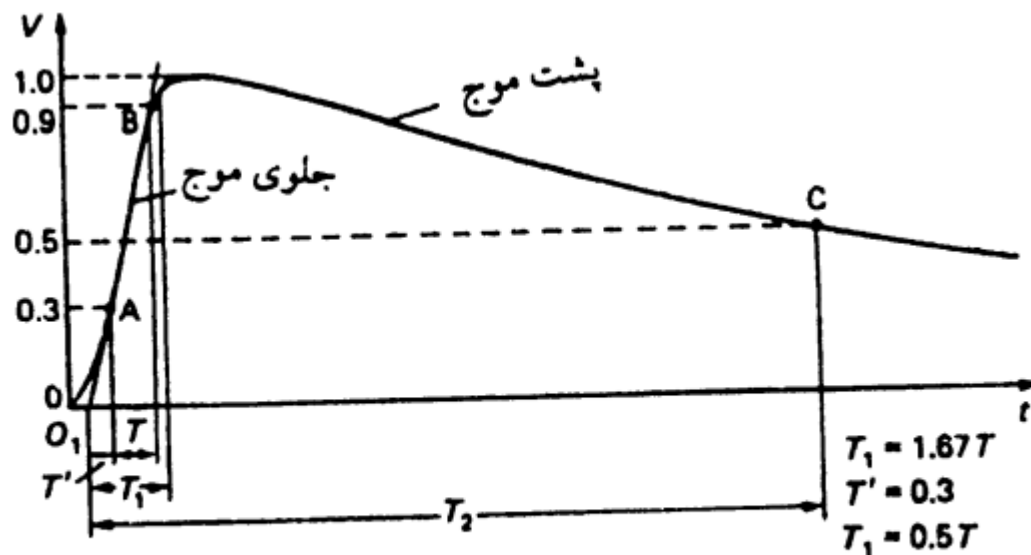
ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای^(۱)

اضافه ولتاژهای ناگهانی و گذرا با دامنه‌های خیلی زیاد در اثر صاعقه‌های آسمانی و سوئیچینگ مانند باز و بسته کردن کلید قدرت و یا اتصال کوتاه روی خطوط انتقال به وجود می‌آیند. این اضافه ولتاژها به صورت یک موج ضربه‌ای غیرنوسانی ظاهر می‌شوند که در مدت زمان بسیار کوتاهی (در حدود چند میکرو ثانیه تا چند میلی ثانیه)، به مقدار دامنه خود می‌رسد و مقدار دامنه آن معمولاً تا چندین مگاولت هم رسیده است. سپس موج ولتاژ تولید شده به صورت نمایی به صفر کاهش می‌یابد. برای آزمایش استقامت الکتریکی تجهیزات عایقی در برابر این اضافه ولتاژها، نیاز به تولید این نوع ولتاژ در آزمایشگاه‌های فشار قوی می‌باشد. شکل (۸-۲۳)، یک موج ضربه‌ای را نشان می‌دهد. آن قسمت از موج که در حال صعود است به پیشانی موج^(۱) و آن قسمت که در حال نزول است به پشت موج^(۲) معروف است. اگرچه امواج ضربه‌ای صاعقه یا سوئیچینگ عملاً دارای اشکال متفاوتی هستند، اما امروزه در آزمایشگاه‌ها آن‌ها را به شکل استاندارد تولید می‌کنند.

1- Impulse Voltage

1- Front of Wave

2- Tail of Wave



شکل (۸-۲۳): شکل موج ولتاژ ضربه

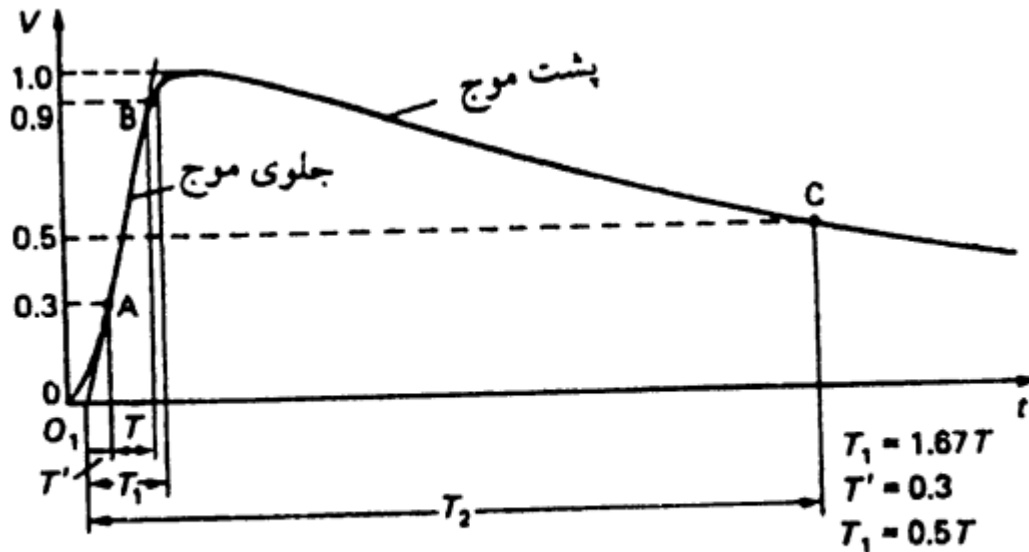
موج ضربه‌ای استاندارد صاعقه

ولتاژهای فشار قوی زودگذر امواج صاعقه در خطوط انتقال، معمولاً دامنه بسیار بزرگی دارند. تحقیقات عملی نشان داده است که این امواج، با سرعت بسیار زیادی و در یک زمان صعود ۰/۵ تا ۱۰ میکروثانیه افزایش می‌یابند و با سرعت کم‌تری و در زمان‌های در حدود ۳۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه به ۵۰٪ مقدار دامنه ولتاژ خود، افت پیدا می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که امواج ولتاژ فشار قوی صاعقه را می‌توان به صورت دو موج نمایی، طبق رابطه زیر نشان داد:

$$V = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{————— (۸-۴۱)}$$

که α و β ثابت‌هایی با اندازه‌های میکروثانیه‌اند.

رابطه اخیر یک شکل موج غیریکنواخت را که یک شیب تند تا مقدار دامنه دارد و سپس به آهستگی به مقدار صفر سقوط می‌کند، نشان می‌دهد. شکل موج عمومی موج ضربه‌ای استاندارد صاعقه در شکل (۸-۲۳) نشان داده شده است. امواج ضربه با زمان صعود و زمان نزول یا نیم پشت موج (زمان رسیدن به ۵۰٪ مقدار دامنه ولتاژ) مشخص می‌شوند. بنابراین، موج ۱۰۰۰ kV با مشخصات ۱/۲/۵۰ μsec، یک موج ولتاژ ضربه با زمان صعود ۱/۲ μsec و زمان نزول ۵۰ μsec و مقدار دامنه ۱۰۰۰ kV را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۲۳): شکل موج ولتاژ ضربه

با مراجعه به شکل (۸-۲۳)، مقدار دامنه ولتاژ با مقدار ۱/۰ در محور عمودی مشخص شده است و مقدار ۱۰۰٪ را نشان می‌دهد. نقاطی که معادل ۳۰٪ و ۹۰٪ مقادیر دامنه ولتاژ در قسمت پیشانی موج می‌باشند با حروف A و B معین شده است. همچنین خط متصل کننده این نقاط تا قطع محور زمان در نقطه O_1 کشیده شده است. در واقع، نقطه O_1 مبدأ واقعی زمان موج ضربه‌ای می‌باشد. ادامه خط مذکور، محور افقی مماس بر دامنه موج ضربه‌ای را قطع می‌کند. فاصله زمانی تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطه O_1 طبق استاندارد زمان پیشانی موج (T_1) می‌باشد. طبق استاندارد بین‌المللی IEC، مقدار زمان پیشانی موج یا T_1 برابر است با:

$$T_1 = 1/2 \pm 30\% \mu\text{sec} \quad (۸-۴۲)$$

همچنین نقطه C روی قسمت نزولی موج، دارای ولتاژی معادل ۵۰٪ مقدار دامنه ولتاژ موج ضربه‌ای است. فاصله زمانی تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطه O_1 زمان نیم‌پشت موج یا زمان نزول موج (T_2) است که طبق استاندارد بین‌المللی IEC مقدار آن برابر است با:

$$T_2 = 50 \pm 20\% \mu\text{sec} \quad (۸-۴۳)$$

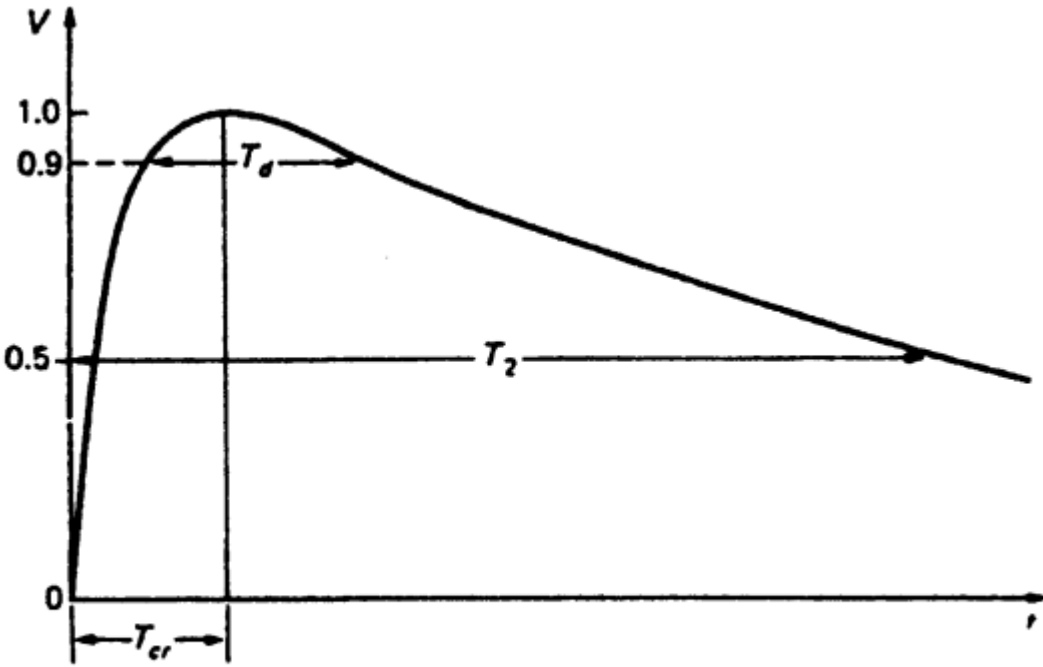
این موج را به اصطلاح، موج ضربه صاعقه $1/2/50 \mu\text{sec}$ می‌نامند؛ یعنی زمان پیشانی موج برابر $1/2 \mu\text{sec}$ و زمان نیم‌پشت موج برابر $50 \mu\text{sec}$ است.

بر اثر نوسانات خط، در هنگام قطع و وصل کلیدها و یا به واسطه اتصال کوتاه، نوعی موج ضربه‌ای روی خط به وجود می‌آید که به آن، موج سوئیچینگ^(۱) می‌گویند. این نوع موج معمولاً طولانی‌تر از موج ضربه‌ای صاعقه است و به چند هزار میکروثانیه می‌رسد. همچنین ممکن است این موج به صورت مستطیل باشد، یعنی سریعاً بالا رفته، تقریباً مدتی ثابت بماند و سپس به سرعت کم شود. این وضعیت موقعی اتفاق می‌افتد که در زمان کوتاهی کلیدی وصل شده و فوراً قطع شود. در مورد این موج، چهار کمیت ذکر می‌شود که عبارتند از: سرعت بالا رفتن موج، مدت زمانی که، موج ۹۰٪ از حداکثر خود را دارا باشد، زمان نیم‌پشت موج و مقدار دامنه ولتاژ موج. شکل موج این نوع موج ضربه‌ای در شکل (۸-۲۴) نشان داده شده است. در این شکل، طبق استاندارد بین‌المللی IEC داریم:

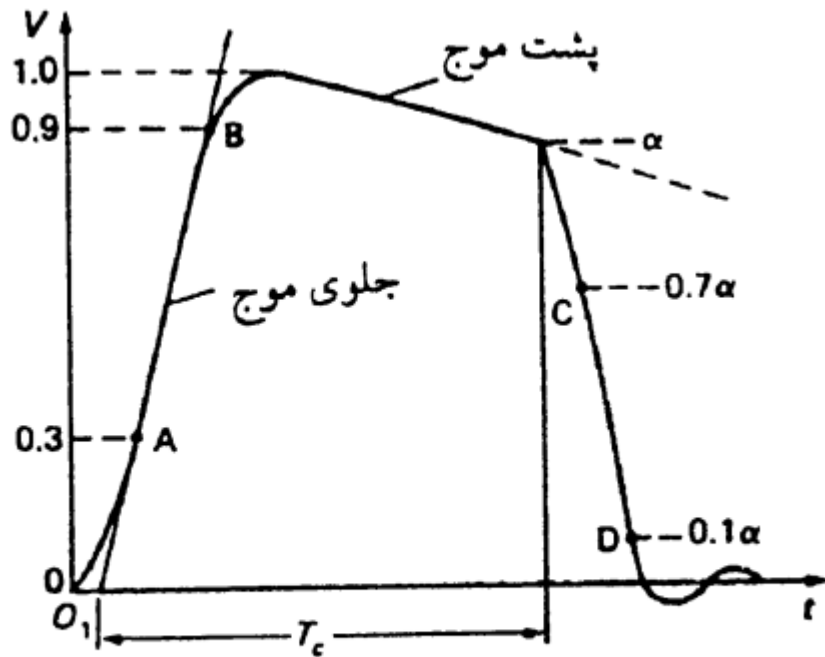
زمان رسیدن موج از مبدأ به صد در صد دامنه $T_{cr} = 250 \pm 20\% \mu\text{sec}$

زمان رسیدن موج از مبدأ به ۵۰٪ دامنه در پشت موج $T_r = 2500 \pm 60\% \mu\text{sec}$

این موج را به اصطلاح، موج ضربه‌ای $250/2500 \mu\text{sec}$ می‌نامند.



شکل (۸-۲۴): مشخصات موج ضربه سوئیچینگ

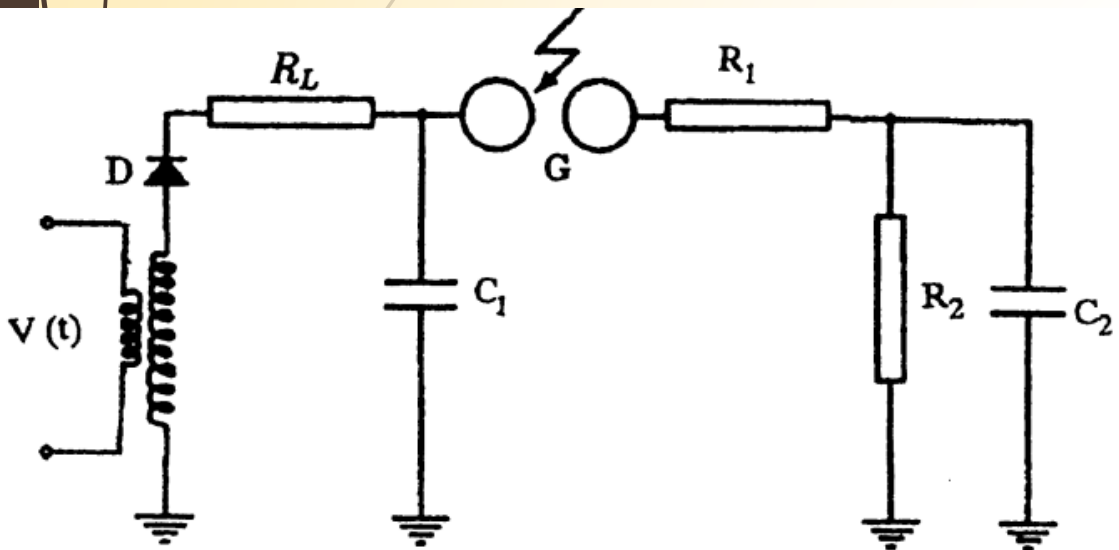


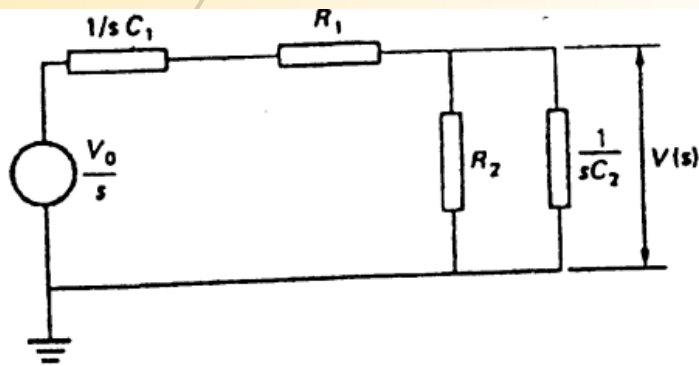
شکل (۸-۲۵): موج ضربه‌ای شکسته در زمان‌های مختلف

اگر موج ضربه‌ای یکباره یا با نوسان مختصری به صفر برسد، یک موج ضربه‌ای شکسته به دست می‌آید. این حالت مثل وضعیتی است که یک موج ضربه‌ای روی خط انتقال باعث ایجاد یک قوس الکتریکی بین خط و زمین شود که در نتیجه یک موج ضربه‌ای شکسته ایجاد می‌شود. در مورد این موج می‌توان کمیت دیگری را نیز بیان کرد که آن هم زمان شروع شکست است؛ زمان شروع شکست، فاصله تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطه O_1 در مورد موج شکسته است. البته برای موج ضربه‌ای شکسته، زمان نیم‌پشت موج معنی ندارد و بنابراین، ذکر نمی‌شود. این موضوع در شکل (۸-۲۵)، قابل مشاهده می‌باشد.

مدار RC تولید ولتاژ ضربه‌ای

ساده‌ترین مدار برای تولید موج ضربه، شکل (۸-۲۶) می‌باشد که از دو مدار RC تشکیل شده است. در این مدار، ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور فشار قوی (حداکثر ۱۰۰ kV)، توسط دیود یکسو کننده D ، یکسو شده و از طریق مقاومت بارگیری R_L ، موجب شارژ خازن C_1 می‌شود. به دلیل بالا بودن مقادیر خازن C_1 و مقاومت R_L ، ثابت زمانی شارژ شدن، بالا بوده و شارژ خازن C_1 در مدت زمان زیادی انجام می‌شود. پس از مدت نسبتاً طولانی که C_1 شارژ شد، ولتاژ آن به حدی می‌رسد که با توجه به فاصله تنظیم شده برای گوی‌های فلزی G در این مدار، بین آنها جرقه زده می‌شود. اکنون خازن C_2 از طریق R_1 شارژ می‌شود که این خازن، همان عایق تحت آزمایش است. در این مدار با توجه به این که $R_2 \gg R_1$ است، ثابت زمانی شارژ خازن C_2 از طریق مقاومت R_1 خیلی کوچک‌تر از ثابت زمانی تخلیه خازن‌های C_1 و C_2 روی مقاومت R_2 است؛ یعنی با توجه به این که مقاومت R_1 کوچک است، خازن C_2 سریع شارژ می‌شود. بنابراین، پس از یک الی دو میکروثانیه، ولتاژ دو سر خازن C_2 به حداکثر خود می‌رسد. سپس خازن‌های C_1 و C_2 از طریق مقاومت R_2 تخلیه





شکل (۸-۲۷): مدار معادل مولد ولتاژ ضربه، پس از جرقه زدن گوی‌های فلزی G

می‌شوند و ولتاژ دو سر خازن C_2 کاهش می‌یابد. با توجه به بزرگ بودن R_2 ، زمان تخلیه طولانی است. به این ترتیب مقاومت R_1 زمان پیشانی موج و مقاومت R_2 زمان پشت موج را کنترل می‌کند. اگر ولتاژ شارژ خازن C_1 هنگام جرقه زدن گوی‌های G (که مانند یک کلید حساس به ولتاژ عمل می‌کنند)، برابر V_0 باشد، با استفاده از تبدیل لاپلاس مدار، به تحلیل آن می‌پردازیم. مدار معادل در حوزه لاپلاس پس از وقوع جرقه بین گوی‌های G در شکل (۸-۲۷) آمده است. خازن C_1 پس از شارژ تا حد ولتاژ V_0 ، مانند یک باتری با ولتاژ V_0 و با امپدانس داخلی معادل خازن C_1 است. جریان کلی این مدار، $I(t)$ و ولتاژ خروجی آن $V(t)$ است.

در این مدار روابط زیر حاکم است:

$$Z_1(s) = R_1 + \frac{1}{sC_1}, \quad Z_2(s) = \frac{R_2 \frac{1}{sC_2}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}}$$

$$I(s) = \frac{\frac{V_0}{s}}{Z_1 + Z_2}$$

$$V(s) = Z_2(s) I(s) = \frac{\left[\frac{V_0}{s} \frac{R_2}{sC_2} \right] / \left[R_2 + \frac{1}{sC_2} \right]}{R_1 + \frac{1}{sC_1} + \frac{R_2/(sC_2)}{R_2 + 1/(sC_2)}}$$

$$V(s) = \frac{\frac{V_s}{s} \frac{R_2}{s C_2}}{R_2 R_1 + \frac{R_2}{s C_1} + \frac{R_1}{s C_2} + \frac{1}{s^2 C_1 C_2} + \frac{R_2}{s C_2}}$$

صورت و مخرج رابطه بالا را در $\frac{SC_2}{R_2}$ ضرب می کنیم:

$$V(s) = \frac{V_s}{s} \frac{1}{SC_2 R_1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{s C_1 R_2} + 1}$$

در مخرج رابطه اخیر، مقدار $R_1 C_2$ را فاکتور می گیریم:

$$V(s) = \frac{V_s}{R_1 C_2} \frac{1}{s^2 + \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right] s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (44-8)$$

با فرض مقادیر زیر،

$$K = R_1 C_2, \quad a = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2}, \quad b = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

خواهیم داشت:

$$V(s) = \frac{V_s}{K} \frac{1}{s^2 + a s + b} \quad (45-8)$$

برای به دست آوردن ریشه‌های مخرج می‌توان نوشت:

$$S^2 + aS + b = 0$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2}$$

با توجه به مقادیر مثبت a و b ، مقادیر α_1 و α_2 کوچک‌تر از صفر هستند. رابطه (۴۵-۸) را می‌توان به صورت زیر در آورد:

$$V(s) = \frac{V_0}{K} \frac{1}{(S - \alpha_1)(S - \alpha_2)} \quad (46-8)$$

با استفاده از عکس تبدیل لاپلاس خواهیم داشت:

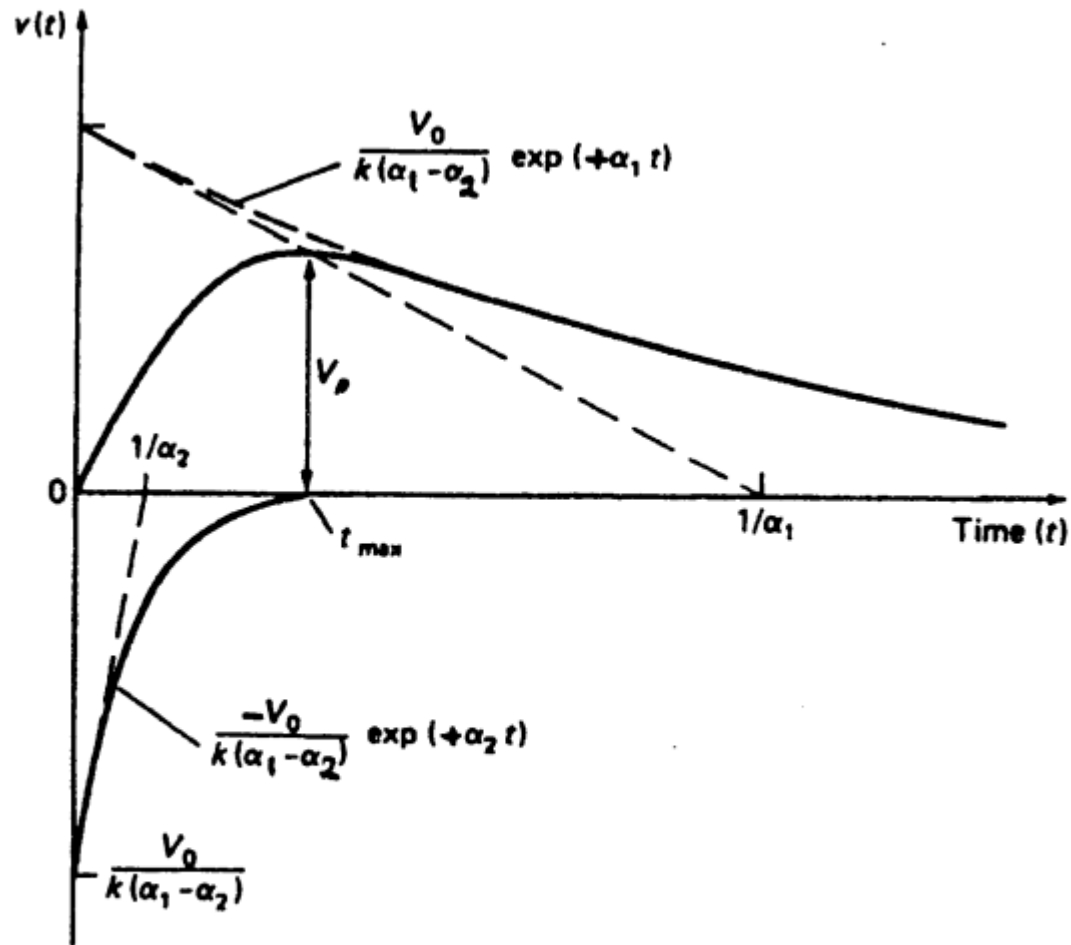
$$V(t) = \frac{V_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t} \right] \quad (47-8)$$

بنابراین، ولتاژ خروجی از جمع دو تابع نمایی با علامت‌های مختلف به دست می‌آید که ثابت زمانی هر کدام برابر است با:

$$\tau_1 = \frac{1}{|\alpha_1|} \quad \text{و} \quad \tau_2 = \frac{1}{|\alpha_2|} \quad (48-8)$$

با توجه به این‌که $|\alpha_2| > |\alpha_1|$ است در نتیجه $\tau_1 > \tau_2$ است؛ یعنی ثابت زمانی تابع نمایی اولی بیشتر از ثابت زمانی تابع نمایی دومی است. منحنی این دو تابع در شکل (۲۸-۸) قابل مشاهده است. اکنون با انتخاب مناسب پارامترهای مدار، می‌توان

شکل موج ضربه‌ای دلخواه را به دست آورد.



شکل (۲۸-۸): موج ولتاژ ضربه تولید شده

بازده مدار مولد ولتاژ ضربه‌ای به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} \quad (49-8)$$

بدیهی است که V_p کم تر از ولتاژ V_0 است. در نتیجه، بازده مدار کم تر از ۱۰۰٪ است. مقدار ولتاژ V_p را می توان با مشتق گیری از رابطه (۴۷-۸) به صورت زیر به دست آورد.

$$\frac{dV(t)}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{V_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[\alpha_1 e^{\alpha_1 t_{max}} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t_{max}} \right] = 0$$

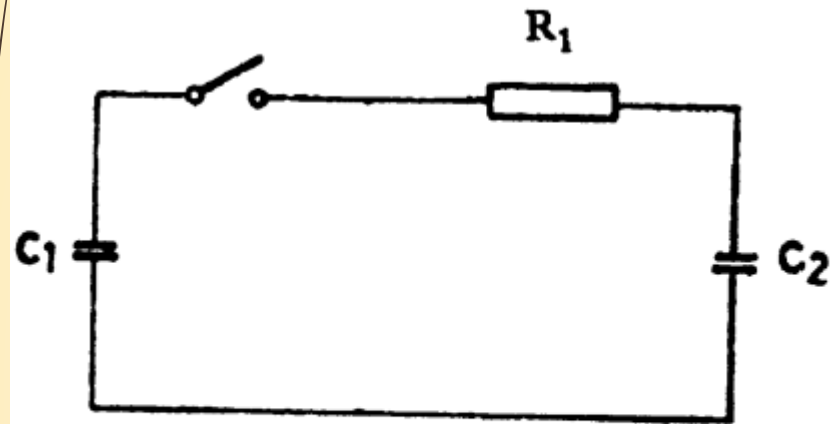
در نتیجه،

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{e^{\alpha_2 t_{max}}}{e^{\alpha_1 t_{max}}}$$

که،

$$t_{max} = \frac{\ln(\alpha_1/\alpha_2)}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (50-8)$$

و در نتیجه ولتاژ V_p و بازده مدار مولد، قابل محاسبه هستند.



شکل (۸-۲۹): مدار شارژ خازن C_2

$$V_p = \frac{V_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right] \quad (۵۱-۸)$$

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} = \frac{1}{K(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right] \quad (۵۲-۸)$$

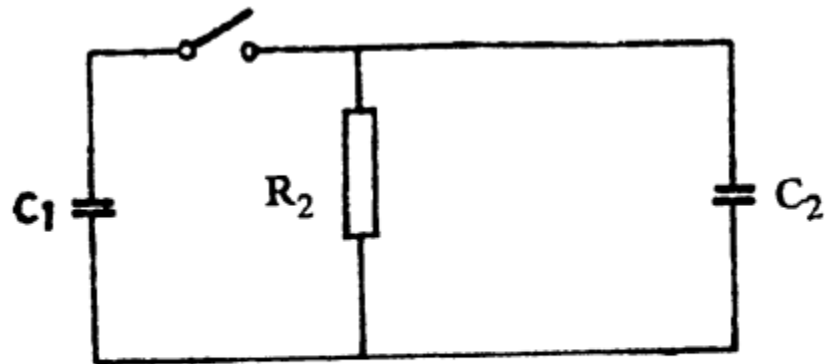
همچنین می توان زمان رسیدن موج به ۵۰٪ مقدار دامنه آن را در پشت موج محاسبه نمود.

در مدارهای موج ضربه ای و در شرایط عملی، روابط $R_1 \ll R_2$ و $C_2 \ll C_1$ حاکم می باشد. در نتیجه برای مدار شارژ خازن C_2 از طریق مقاومت R_1 و خازن C_1 شکل (۸-۲۹) حاصل می شود. ثابت زمانی شارژ خازن C_2 در این مدار به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\tau_2 = \frac{1}{|\alpha_2|} = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = R_1 \frac{C_2}{1 + C_2/C_1} \quad (۵۳-۸)$$

با توجه به رابطه $C_1 \gg C_2$ به صورت تقریبی می توان نوشت:

$$\Rightarrow \tau_2 = \frac{1}{|\alpha_2|} \simeq R_1 C_2 \quad (۵۴-۸)$$



شکل (۸-۳۰): مدار تخلیه خازن‌های C_1 و C_2

چون ظرفیت خازنی C_2 (عایق نمونه تحت آزمایش) ثابت و غیر قابل کنترل است، بنابراین، فقط با تغییر مقاومت R_1 ، ثابت زمانی τ_2 کنترل می‌شود. ثابت زمانی شارژ خازن (τ_2) متناسب با زمان رسیدن موج به مقدار حداکثر (یعنی متناسب با زمان جلوی موج) است. بنابراین، با تغییر مقاومت R_1 ، زمان جلوی موج کنترل می‌شود. مقادیر τ_2 برای موج‌های استاندارد ضربه‌ای برابر است با:

$$\tau_2 = 0.405 \mu\text{sec} \quad \text{برای موج استاندارد} \quad 1.2/50 \mu\text{sec}$$

$$\tau_2 = 62.5 \mu\text{sec} \quad \text{برای موج استاندارد} \quad 250/2500 \mu\text{sec}$$

برای تخلیه خازن‌های C_1 و C_2 در مقاومت R_2 ، مدار شکل (۸-۳۰) را می‌توان ارائه داد. در این مدار، ثابت زمانی تخلیه خازن‌های C_1 و C_2 در مقاومت R_2 برابر است با:

$$\tau_1 = \frac{1}{|\alpha_1|} = R_2(C_1 + C_2) \quad (8-55)$$

با توجه به این‌که $C_1 \gg C_2$ است، از این‌رو، داریم:

$$\tau_1 = \frac{1}{|\alpha_1|} \simeq R_2 C_1 \quad (8-56)$$

در اینجا نیز ظرفیت خازنی C_1 در ساختمان مولد، مقدار ثابتی دارد و قابل تغییر

نیست. بنابراین، فقط با تغییر مقاومت R_2 ثابت زمانی τ_1 قابل کنترل است. ثابت زمانی تخلیه خازن‌ها (τ_1)، متناسب با زمان نزول موج از مقدار حداکثر است (یعنی متناسب با زمان نیم‌پشت موج است). بنابراین، با تغییر مقاومت R_2 زمان نیم‌پشت موج کنترل می‌گردد. مقدار C_1 برای دو موج استاندارد به صورت زیر است.

$$\tau_1 = 68/2 \mu\text{sec} \quad 1/2/50 \mu\text{sec} \quad \text{برای موج استاندارد}$$

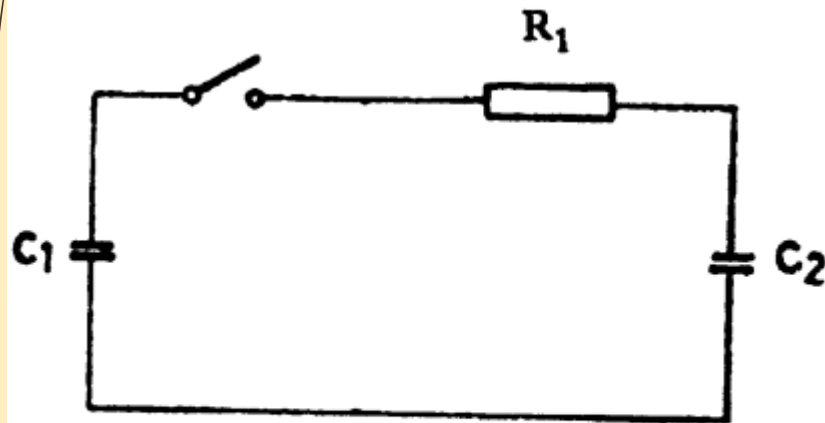
$$\tau_1 = 3155 \mu\text{sec} \quad 250/2500 \mu\text{sec} \quad \text{برای موج استاندارد}$$

ظرفیت مولد C_1 و ظرفیت بار C_2 بسته به طراحی مدار و موضوع آزمایش ثابت خواهد بود. از این رو شکل موج درخواستی فقط با کنترل و تغییر مقادیر R_1 و R_2 حاصل خواهد شد.

لازم به ذکر است که در مدار شکل (۸-۲۹)، خازن C_1 ، خازن C_2 را از طریق R_1 شارژ می‌کند. زمان لازم برای شارژ خازن C_2 به طور تقریبی ۳ برابر ثابت زمانی مدار شارژ است و به وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_1 = 3R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 3R_1 C_e \quad \text{و} \quad C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (8-57)$$

اگر R_1 بر حسب اهم و C_e بر حسب میکروفاراد باشد، در نتیجه τ_1 بر حسب میکروثانیه خواهد بود.

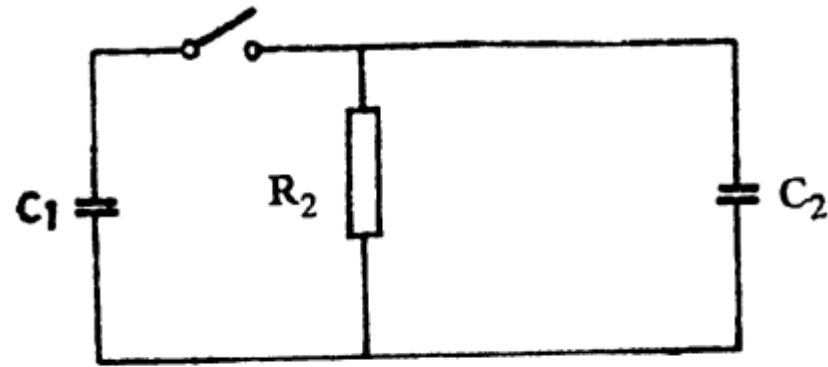


شکل (۸-۲۹): مدار شارژ خازن C_2

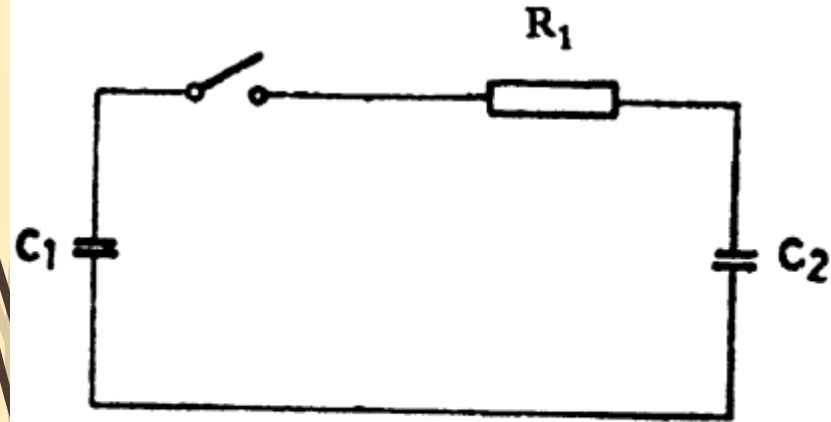
برای زمان دشارژ یا زمان پشت موج، خازن‌های C_1 و C_2 به صورت موازی در نظر گرفته می‌شوند که از طریق مقاومت‌های R_1 و R_2 دشارژ می‌شوند (شکل ۸-۳۰ را ببینید). از این رو زمان ۵۰٪ دشارژ به طور تقریبی با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\tau_2 = 0.7 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2) \quad (8-58)$$

در دو رابطه اخیر، مقادیر τ_1 و τ_2 برای مدارهای معادل در شکل‌های (۸-۲۹) و (۸-۳۰) مشخص شده است. با استفاده از روابط تقریبی، زمان‌های جلوی موج و پشت موج برای موج‌های ضربه را می‌توان در محدوده $\pm 20\%$ از موج ضربه استاندارد تخمین زد. دامنه موج ضربه‌ای تولیدی را می‌توان با تغییر فاصله هوایی گوی‌های فلزی G کنترل نمود. هر چقدر فاصله هوایی گوی‌های فلزی G بیشتر شود، خازن C_1 امکان شارژ با ولتاژ V_0 بالاتری را پیدا می‌کند و بنابراین، جرّقه و برقراری اتصال بین گوی‌ها در ولتاژ بالاتر خواهد بود. در نتیجه، دامنه ولتاژ ضربه‌ای تولیدی بیشتر می‌شود. البته ولتاژ نامی خازن C_1 مقدار ولتاژ شارژ V_0 آن را محدود می‌کند.



شکل (۸-۳۰): مدار تخلیه خازن‌های C_1 و C_2



شکل (۸-۲۹): مدار شارژ خازن C_2