

## 7.2. Излучение электромагнитных волн открытым колебательным контуром

Симметричным вибратором называется прямолинейный проводник длиной  $l_{\text{виб}} = 2l$ , в середине которого включен источник э.д.с. Или приемник (рис. 7.12). Он имеет симметричное относительно середины распределение тока и напряжение по длине плеч  $l$  и геометрическую симметрию. Можно получить симметричный вибратор из разомкнутой двухпроводной линии, если оба ее провода расположить в линию. Однако имеется существенное отличие симметричного вибратора от двухпроводной линии. Параметры двухпроводной линии ( $L1$ ,  $C1$ ) постоянны по ее длине. Распределенная емкость вибратора (рис. 7.12) непостоянна по его длине. Поэтому для

$$r_A = 120 \left( \ln \frac{l}{a} - 1 \right)$$

определения волнового сопротивления вибратора применяется формула которая применима при  $l > \lambda/2$ . и формула В.Н. Кессених.

В этих формулах  $R_A$  - волновое сопротивление вибратора;  $l$  — длина плеча;  $a$  - радиус провода,  $\lambda$  - длина волны. Симметричный вибратор излучает энергию, поэтому распределение амплитуд тока по длине вибратора, выполненном даже из идеального проводника, отличаются от закона стоячей волны. Это отличие тем заметнее, чем больше диаметр вибратора, или, точнее, чем больше  $a/\lambda$ .

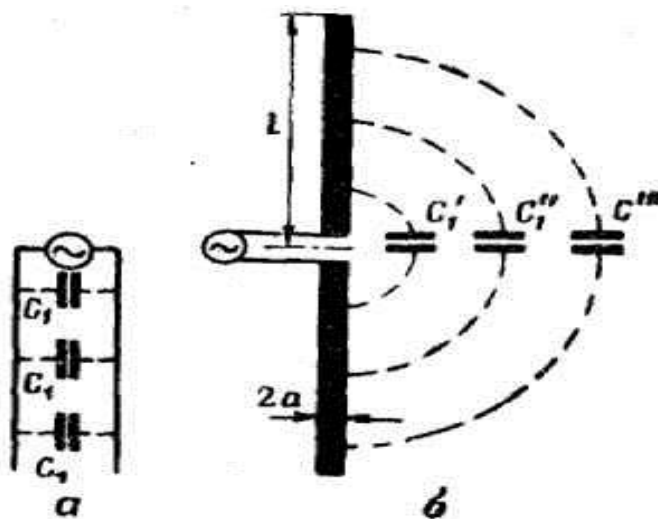


Рис.7.12. Симметричная линия (а) и симметричный вибратор (б).

Излучаемую энергию можно считать поглощенной активным сопротивлением излучения, а последнее можно представить себе распределенным по длине вибратора. В таком предположении распределение амплитуд тока и напряжения по длине вибратора будет подобно распределению их вдоль двухпроводной линии со значительными активными потерями (рис.7.13). Излучение энергии, или наличие значительных активных потерь, вызывает уменьшение скорости распространения волн вдоль вибратора по сравнению с двухпроводной линией без потерь.

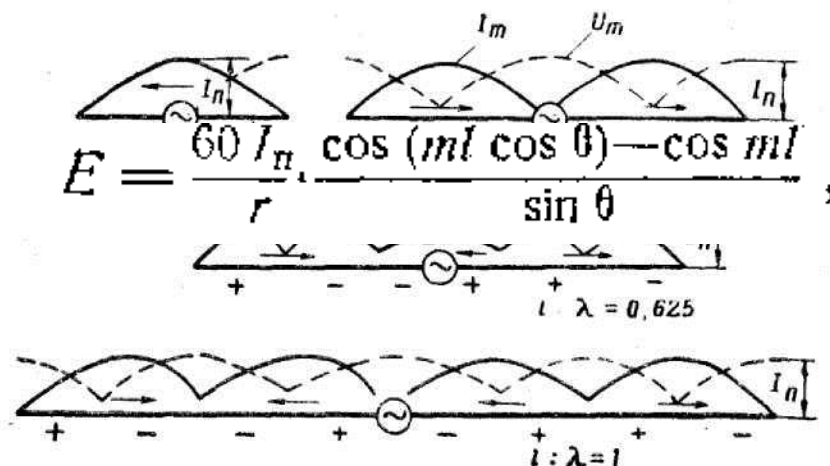


Рис.7.13. Распределение амплитуд тока и напряжения (пунктирная линия) вдоль оси симметричного вибратора.

### Характеристики и параметры симметричного вибратора.

Напряженность поля излучения симметричного вибратора определяется по формуле

где  $I_n$  – ток в пучности вибратора;  $r$  - расстояние от вибратора до точки наблюдения;  $\theta$  – угол, отсчитанный от оси вибратора до направления на точку наблюдения,  $m=2\pi/\lambda$

Направленные свойства вибратора определяются формулой

$$F(\theta) = \frac{60 \cos (ml \cos \theta) - \cos ml}{\sin \theta},$$

которая и является характеристикой направленности. Нормированной характеристикой направленности симметричного вибратора является функция  $f(\theta) = F(\theta)/F(90^\circ)$ , то есть

$$f(\theta) = \frac{\cos(ml \cos \theta) - \cos ml}{(1 - \cos ml) \sin \theta}.$$

$$F(\theta) = \frac{60 \cos(ml \sin \theta) - \cos ml}{\cos \theta}.$$

В плоскости, перпендикулярной оси вибратора и проходящей через его середину, то есть Н-плоскости, вибратор не обладает направленностью вследствие осевой симметрии. Следовательно, диаграммой направленности в этой плоскости является окружность. В плоскости вибратора, или Е-плоскости, направленные свойства вибратора определяются отношением  $l:\lambda$ . Если  $l = 0,25$ , то есть  $2l = 0,5$ , то вибратор называется полуволновым и его характеристика направленности выражается формулой

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \approx \sin \theta.$$

Диаграммы направленности симметричного вибратора в плоскости *E* при различной его длине показаны на рис. 7.14. Во всех случаях вибратор не излучает вдоль его оси. При  $l:\lambda > 0,5$  диаграммы имеют много лепестков, что объясняется интерференцией волн, излученных различными элементами вибратора.

В пределах одного лепестка фаза волны не зависит от направления, а при переходе через нулевое направление скачком изменяется на обратную. Симметричный вибратор излучает сферические волны, линейно поляризованные в любой точке пространства. Центр сферической волны называется фазовым центром. Симметричный вибратор имеет фазовый центр, который совпадает с серединой вибратора.

Максимальное значение к.н.д. антенны можно определить по формуле

$$D_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}^2}{30 R_{\text{изл}}},$$

где  $F_{\text{макс}}$  — максимальное значение ненормированной характеристики направленности.

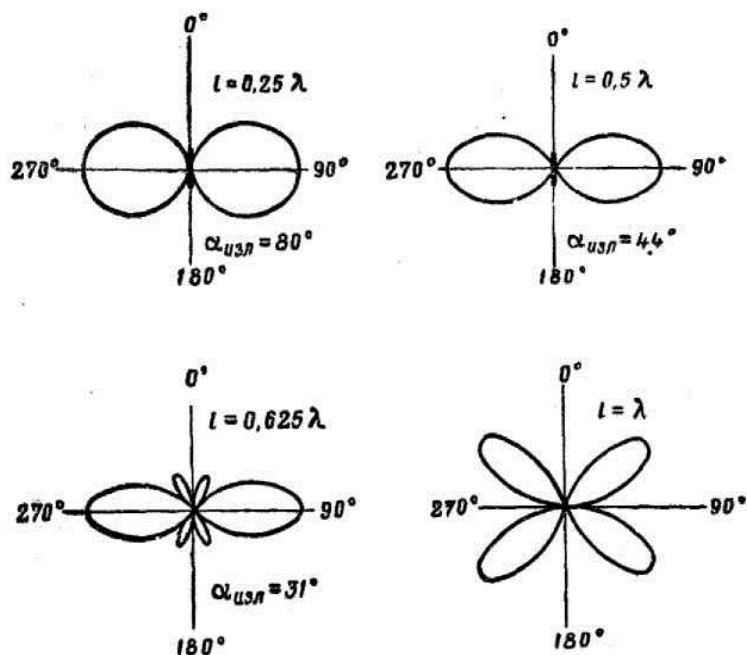


Рис.7.14. Характеристики направленности симметричного вибратора

Для симметричного вибратора  $F_{\text{макс}}=60$ , а сопротивление излучения полуволнового вибратора равно 73,1 Ома. Поэтому для полуволнового вибратора  $D_{\text{макс}}=1,64$ , для одноволнового  $D_{\text{макс}}=2,4$ , а наибольшее значение  $D_{\text{макс}}=3,1$  имеет вибратор длиной  $l=0,625\lambda$ .

**Сопротивление излучения симметричного вибратора.** Практически сопротивление излучения рассчитывается по сложной формуле, на основании которой построен график на рис. 7.15. Если отношение  $l:\lambda$  не превышает 0,1, то  $R_{\text{изл}}=20(ml)^4$ .

Точный расчет входного сопротивления также затруднителен. Для практических целей можно рассчитать входное сопротивление по приближенным формулам. Если минимум тока расположен не ближе, чем  $(0,1 \div 0,15)\lambda$  к точкам подключения питания, и к.п.д. вибратора принят равным единице, то

$$Z_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{изл}}}{\sin^2 ml} - j\rho_{\Lambda} \operatorname{ctg} ml,$$

т. е.

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{изл}}}{\sin^2 ml}, \quad X_{\text{вх}} = -j\rho_A \operatorname{ctg} ml.$$

Если питание включено в точках минимального тока или минимум тока расположен не далее  $0,5\lambda$  от точек питания, то

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{изл}}}{\sin^2 ml + \left(\frac{R_{\text{изл}}}{\rho_A}\right)^2},$$

$$X_{\text{вх}} = -j \frac{\rho_A}{2} \cdot \frac{\sin^2 ml}{\sin^2 ml + \left(\frac{R_{\text{изл}}}{\rho_A}\right)^2}.$$

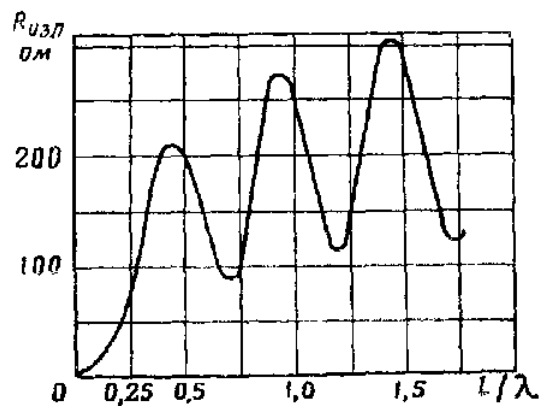


Рис.7.15. Зависимость сопротивления излучения симметричного вибратора от его длины.

**Действующая длина** симметричного вибратора определяется по формуле

$$h_d = \frac{\lambda}{\pi} (1 - \cos ml).$$

Для полуволнового вибратора

$$h_d = \frac{\lambda}{\pi}.$$

**Способы питания симметричных вибраторов.** В диапазоне коротких волн симметричный вибратор можно подключать к генератору (приемнику) с помощью двухпроводных воздушных симметричных линий. Так как входное сопротивление вибратора обычно не отличается от волнового сопротивления фидера, то для согласования применяются различные согласующие устройства. Одним из них является дельта-трансформатор, который

представляет собой расходящийся фидер, длиной  $L$  (рис. 7.16). Если представить себе полуволновый вибратор согнутым в его середине, то получим эквивалентную двухпроводную линию длиной  $l=l_1+l_2=\lambda/4$ . Легко показать, что реактивное входное сопротивление разомкнутой линии длиной  $l_1$  и короткозамкнутой линии длиной  $l_2$  равны по величине и противоположны по знаку и, следовательно, эквивалентной схемой является резонансный контур (рис.7.16, в). Активным сопротивлением эквивалентного колебательного контура является сопротивление излучения, пересчитанное к точкам аб. Его можно определить по формуле

$$R = \frac{R_{изл}}{\sin^2 ml_1} = \frac{R_{изл}}{\cos^2 ml_2}.$$

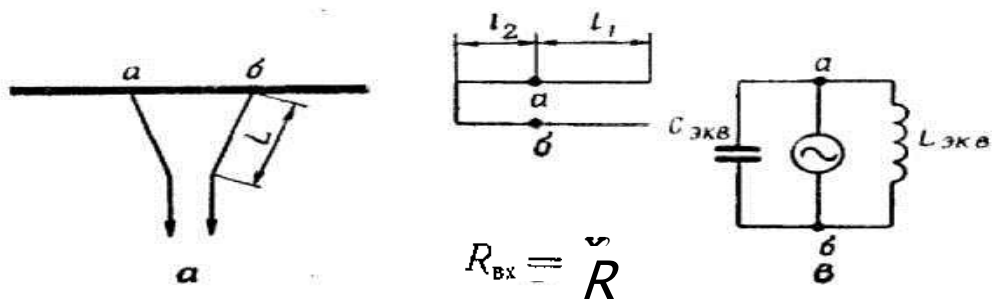


Рис.7.16. Дельта-трансформатор: а - схема; б, в – эквивалентные схемы вибратора.

Входное сопротивление эквивалентного контура, т.е. входное сопротивление вибратора в точках аб определяется как отношение квадрата реактивного сопротивления одной ветви контура к активному сопротивлению, т.е.

Так как  $X^2 = \rho_A^2 \operatorname{ctg}^2 ml_1 = \rho_A^2 \operatorname{tg}^2 ml_2$ , то

$$R_{вх} = \frac{\rho_A^2 \operatorname{tg}^2 ml_2}{R} = \frac{\rho_A^2 \sin^2 ml_2}{73}.$$

Положение точек питания аб на вибраторе можно подобрать таким, что входное сопротивление вибратора окажется равным волновому сопротивлению фидера в точках аб, то есть будет выполнено условие согласования. Однако волны могут отражаться от расходящейся части фидера, так как его волновое сопротивление изменяется по длине. Это отражение будет незначительным, если волновое сопротивление изменяется по длине плавно и если фазы волн, отраженных от различных точек трансформатора, окажутся противоположными на его входе. Этим условиям удовлетворяет длина расходящейся части, равная целому числу полуволн.

В некоторых радиостанциях связи применяется питание вибратора с помощью однопроводного фидера,

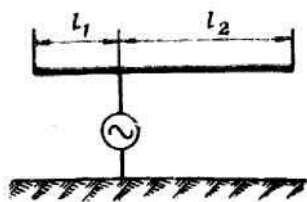


Рис.7.17. Питание вибратора однопроводным фидером.

подключаемого к точке вибратора между его серединой и концом (рис.7.17). Этот способ получается из предыдущего путем замены двухпроводного фидера однопроводным. Расчет входного сопротивления производится аналогично. Если фидер и вибратор имеют равные диаметры, то

согласование получается при  $l_1=0,36(l_1+l_2)$ .

В диапазоне УКВ симметричный вибратор питают с помощью коаксиального фидера. Непосредственное их соединение нарушает симметрию, что приводит к уменьшению  $K_{изл}$  и изменению формы характеристики направленности. Для устранения этого применяются симметрирующие переходные устройства: запирающий стакан, U-колени, симметрирующая приставка. Симметричный вибратор подключается к симметричному выходу симметрирующего устройства, как это для примера показано на рис. 7.18. На рис. 7.19 показана схема щелевого симметрирующего устройства. Оба плеча вибратора подключены в точках а и б к наружной оболочке кабеля, которая двумя щелями разрезана на две части. Внутренний провод присоединен к одной из образовавшихся частей оболочки, а обе части оболочки образуют двухпроводную короткозамкнутую линию, к которой и подключены плечи вибратора. Фигурная щель изменяет волновое сопротивление двухпроводной линии по ее длине, что необходимо для согласования. На резонансной частоте длина короткозамкнутой линии равна четверти волны, и потому утечки токов из плеч вибратора практически отсутствуют. С изменением волны утечки токов возрастают, но симметрия питания не нарушается.

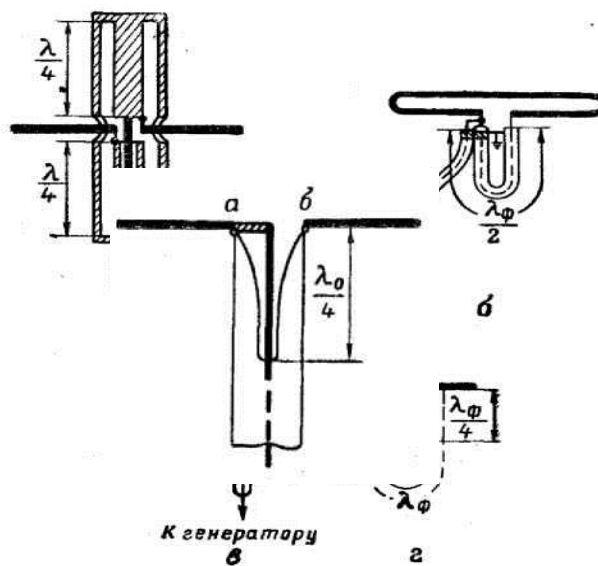


Рис.7.

Рис.7.18. Питание симметричного вибратора с помощью коаксиального фидера: а - двойной запирающий стакан; б - U-колени при  $R_{вх}=300\text{Ом}$ ; в -запирающий стакан; г - U-колени при  $R_{вх}=75\text{Ом}$ .

Несимметричный вибратор. Несимметричным называется вибратор, одно плечо которого по размерам или форме отличается от другого. В широком диапазоне волн применяется несимметричный вибратор, который представляет собой одно плечо симметричного вибратора, а второе его плечо заменено металлическим телом. Таким телом могут быть; шасси радиостанции, корпус самолета, автомобиля и т.д., система низко расположенных над землей проводников (воздушный противовес), система закопанных в землю проводников, т.е. земля (рис.7.20).

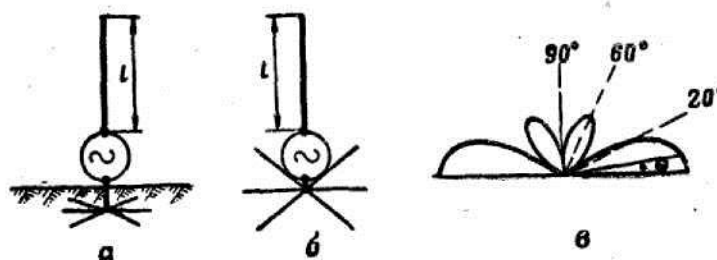


Рис.7.19 Несимметричный вертикальный вибратор: а - с заземлением; б - с воздушным противовесом; в - характеристика направленности в вертикальной плоскости при  $l=0.63\lambda$ .

Один полюс возбуждающего генератора присоединяется к вибратору, а второй к металлическому телу или, как принято говорить, к заземлению. Заземление, следовательно, является обратным проводом для тока вибратора: под действием э.д.с. Генератора в течение одного полупериода ток протекает от заземления к вибратору, а в течение второго полупериода в обратном направлении. С учетом влияния идеально проводящей направленности

вертикального несимметричного вибратора в вертикальной плоскости можно определить по формуле

$$f(\theta) = \frac{\cos(ml \sin \theta) - \cos ml}{(1 - \cos ml) \cos \theta},$$

где угол  $\theta$  отсчитывается от горизонта.

**Характеристика направленности.** Из этой формулы видно, что характеристика направленности несимметричного вибратора в плоскости  $E$  зависит от отношения  $l:\lambda$ . В горизонтальной плоскости (плоскости  $H$ ) вибратор не обладает направленностью. При  $l \leq 0.7\lambda$  главный максимум излучения направлен горизонтально (рис. 7.20,в).

Проводимость реальной почвы не бесконечна велика. Поэтому главный максимум излучения направлен под некоторым углом  $\theta_{\text{макс}}$  к горизонту. Чем длиннее волна и чем больше проводимость почвы, тем меньше угол  $\theta_{\text{макс}}$ . На длинных волнах  $\theta_{\text{макс}} = 0$ .

Несимметричный вибратор излучает энергию только в одном полупространстве: вторая половина вибратора (заземление) энергии не излучает. Поэтому к.н.д. несимметричного вибратора в два раза больше к.н.д. симметричного вибратора. При равных входных токах и равных длинах плеч симметричного и несимметричного вибраторов последний излучает вдвое меньшую мощность. Так как мощность излучения пропорциональна сопротивлению излучения, то сопротивление излучения несимметричного вибратора в два раза меньше сопротивления излучения симметричного вибратора. Входное сопротивление несимметричного вибратора тоже в два раза меньше входного сопротивления симметричного вибратора.

*Активное входное сопротивление* такого вибратора

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{изл}} + R_{\text{п}}$$

где  $R_{\text{п}}$  — сопротивление потерь.

Если размеры вибратора малы по сравнению с длиной волны ( $l < 0.1\lambda$ ), что имеет место на длинных волнах, то активное входное сопротивление (без учета потерь) можно определить по формуле

$$R_{\text{вх}} = \frac{10 (ml)^4}{\sin^2 ml} \approx 400 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2,$$

т.к. при малых углах  $\sin^2 ml = (ml)^2$ . Если  $l \leq 0.35\lambda$ , то реактивную составляющую входного сопротивления можно определить по формуле

$$X_{\text{вх}} = -\rho_A \operatorname{ctg} ml,$$

Действующая длина вибратора определяется по формуле

$$h_d = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{1 - \cos ml}{\sin ml}.$$

Для увеличения к.п.д. антенны нужно увеличивать сопротивление излучения и уменьшать сопротивление потерь. Сопротивление потерь заземленного вибратора можно считать равным сопротивлению заземления. Следовательно, заземление должно быть выполнено так, чтобы оно имело минимальное сопротивление.

Увеличение сопротивления излучения связано с увеличением высоты вибратора, что технически сложно и дорого. Без увеличения высоты можно увеличить действующую длину применением горизонтальных частей (рис. 7.21). Горизонтальная часть представляет собой один или несколько параллельных проводов, поддерживаемых опорными мачтами. Она служит емкостной нагрузкой на конце антенны и не излучает энергии. В Т-образной антенне токи в горизонтальных частях противоположны, и их излучение взаимно компенсируется, кроме того, зеркальное изображение горизонтальной части противофазно самой горизонтальной части и их излучения взаимно компенсируются.

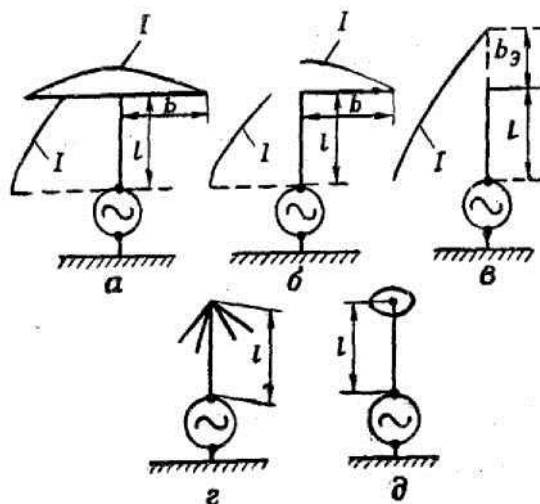


Рис.7.20. Вертикальные несимметричные антенны с горизонтальными частями: а - Т-образная; б - Г-образная; в - эквивалентная схема Г-образной антенны; г - зонтичная; д - дисковая.

При наличии горизонтальной части ток в вертикальном вибраторе распределен более равномерно, площадь тока приближается к прямоугольнику и действующая высота увеличивается. Ее можно определить по формуле

$$h_d = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{(\cos mb_3 - \cos ml_3)}{\sin ml_3},$$

Эквивалентная длина горизонтальной части для Г- и Т-образных антенн определяется соответственно из уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} mb_3 &= \frac{\rho_r}{\rho_A} \operatorname{ctg} mb, \\ \operatorname{ctg} mb_3 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_A} \operatorname{ctg} mb, \end{aligned}$$

Входное реактивное сопротивление вертикального нагруженного вибратора определяется по формуле

$$X_{\text{вх}} = -\rho_A \operatorname{ctg} m(l + b_3).$$

Если антенна настроена в резонанс, то ее входное сопротивление чисто активное, заданная мощность достигается при меньшем напряжении генератора, и создаются оптимальные условия для работы генератора.