

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НА ПАРАМЕТРОНАХ

Н. П. РУССКИХ, В. И. САМОЙЛЕНКО

В работе исследуется зависимость быстродействия устройств на параметронах от добротности контуров параметронов, величины связи между параметронами, амплитуды подкачки, скважности импульсов подкачки и др.

Найдено оптимальное значение добротности контура, при котором можно обеспечить наибольшее быстродействие.

Показано, что для увеличения быстродействия коэффициент связи между параметронами следует увеличивать до величины 0,1—0,15. Дальнейшее увеличение связи нецелесообразно. Показана зависимость между возможным быстродействием и надежностью систем на параметронах.

Вопросы быстродействия и надежности ЦВМ—основные вопросы современной вычислительной техники.

В видеоимпульсных ЦВМ при повышении тактовой частоты логические и запоминающие элементы становятся менее устойчивыми или перестают выполнять свои функции. Намечившиеся пути повышения быстродействия видеоимпульсных систем: применение туннельных диодов, полевых полупроводниковых триодов, многослойных полупроводниковых структур и т. д. позволили увеличить тактовую частоту ЦВМ за 1 мгу. Однако дальнейшее увеличение тактовой частоты до десятков мегагерц осложняется из-за трудности однонаправленной передачи информации, обеспечения достаточно широкополосных цепей, связывающих элементы ЦВМ, различного рода паразитных связей и т. д.

Аналогичные вопросы возникают и при проектировании ЦВМ на параметронах. Наиболее простой путь повышения быстродействия параметронных устройств—увеличение частоты подкачки—оказывается весьма сложным из-за трудностей, связанных с созданием цепей передачи информации и подкачки, и из-за различных паразитных связей, увеличивающихся с частотой. Кроме того, с увеличением частоты подкачки возникают дополнительные трудности в проектировании параметронов, связанные с ухудшением добротности варикапов (или других нелинейных элементов), применяемых в параметронах. Поэтому возникает необходимость максимально эффективного использования частоты подкачки, т. е. обеспечения максимального быстродействия и надежности при заданной частоте.

При проектировании быстродействующих систем на параметронах следует учитывать не только свойства отдельной параметронной ячейки (длительность фронтов, амплитуду, потребляемую мощность.

и т. д.), но и взаимодействие соседних ячеек через цепи связи, питания и за счет наводок.

Кроме того, для обеспечения наивысшего быстродействия нужно выбрать оптимальный режим подкачки—амплитуду, перекрытие импульсов подкачки и т. д.

Для определения оптимальных по быстродействию параметров ячеек и связи между ними придется сделать ряд упрощающих математических выкладки допущений и ограничений, иначе задача сведется к уравнениям, решения которых современная математика не предлагает.

Будем полагать, что данный параметрон связан с m предыдущими и n последующими параметронами двухсторонней линейной связью. При этом будем считать, что n не более двух. Это охватывает достаточный круг схем на параметронах, например, счетчики и регистры. Так как связь между параметронами достаточно мала, то влияние помех от параметронов, не связанных с данным непосредственно, учитываться не будет.

Примем, что напряжение подкачки подается в виде прямоугольных импульсов и действие его сводится к внесению в контур параметрона отрицательного сопротивления ρ , постоянного в течение импульса подкачки.

При рассмотрении нарастания колебаний в параметроне будем исходить из линейно-ломанной аппроксимации нелинейных характеристик параметрона. Будем считать, что установление одной из двух возможных стационарных фаз колебаний определяется только начальными условиями, т. е. после подачи подкачки на параметрон процессы в нем не зависят от внешних воздействий на частоте субгармоники.

Взаимная расстройка параметронов, определяемая, в основном, технологическим разбросом параметров элементов схемы, учитываться не будет, так как при существующем разбросе параметров дополнительный сдвиг фазы фазирующего сигнала относительно фазы колебаний подкачки за счет расстройки не превышает $10-15^\circ$. При этом приращение амплитуды синусной составляющей является величиной второго порядка малости по сравнению с ее амплитудой и в первом приближении может не учитываться.

Тепловые шумы будем считать достаточно малыми по сравнению с сигналом синхронизации параметрона. Их будем учитывать только при определении минимально необходимого напряжения синхронизации для установления требуемой фазы с необходимой надежностью.

При сделанных предположениях передний и задний фронты импульсов субгармоники могут быть описаны удобными для анализа экспоненциальными зависимостями.

Начальные условия будем задавать амплитудой синусной составляющей в момент включения подкачки u_{s0} . Принятая линейная аппроксимация переходных процессов не учитывает фазовых сдвигов при нарастании и спаде колебаний.

Длительность переднего фронта субгармонических колебаний определяется соотношением

$$u_{уст} = u_{s0} e^{\frac{\tau_n}{T_n}}$$

или

$$\omega \tau_n = \omega T_n \ln \frac{u_{уст}}{u_{s0}},$$

где $u_{уст}$ — амплитуда установившихся колебаний,

T_n — постоянная времени контура параметрона, которая определяется его полным сопротивлением

$$\omega T_n = \frac{2\omega L}{\rho - r} = \frac{2}{\frac{1}{Q_p} - \frac{1}{Q_r}},$$

ρ — отрицательное сопротивление, вносимое в контур параметрона при включении подкачки,

L — индуктивность контура,

r — полное сопротивление потерь контура с учетом нагрузки,

ω — частота первой субгармоники подкачки,

$Q_p = \frac{\omega L}{\rho}$ — эффективная добротность отрицательного сопротивления,

$Q_r = \frac{\omega L}{r}$ — добротность нагруженного контура.

Итак,

$$\omega \tau_n = \frac{2}{\frac{1}{Q_p} - \frac{1}{Q_r}} \ln \frac{u_{уст}}{u_{s0}}. \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что для уменьшения длительности переднего фронта колебаний следует увеличивать добротность Q_r , уменьшать Q_p , т. е. увеличивать вносимое отрицательное сопротивление ρ , и увеличивать u_{s0} . Однако после выключения подкачки свободные колебания в контуре будут затухать тем дольше, чем выше добротность контура Q_r . Поэтому следует искать оптимальное значение Q_r , при котором быстроедействие будет максимальным.

В момент включения подкачки напряжение на входе параметрона u_0 складывается из трех составляющих: фазировочного напряжения u_ϕ от m предыдущих параметронов, в которых колебания в момент включения подкачки были равны установившемуся значению; напряжения реакции $u_{посл}$ от n последующих параметронов, в которых колебания затухали после выключения подкачки и, наконец, остаточного напряжения $u_{ост}$ колебаний, сохранившихся в контуре от предыдущего включения подкачки:

$$u_0 = u_\phi + u_{посл} + u_{ост}. \quad (2)$$

При этом не учитывался сигнал обратной информации от группы параметронов, работающих в режиме генерации в те же моменты времени, что и фазирующие параметроны. Такое допущение является правомерным при условии, что рассматриваемый параметрон нагружен не более чем на два параметрона. Кроме того, в выражении (2) не учитываются допуски на отклонения параметров элементов схемы. Исследования показали, что разброс параметров элементов схемы параметрона вызывает вариации амплитуды и фазы установившихся колебаний, которые являются малыми из-за уплощения амплитудно-частотной характеристики параметрона, и в первом приближении могут не учитываться.

Нахождение формы колебаний в контуре при сложном воздействии на его вход—задача достаточно трудная. Полагаем, что напряжение в данном параметроне от предыдущего, с ним связанного, пропорционально напряжению на этом параметроне. Если коэффициент связи между параметронами k ($k < 1$), то для наиболее опасного случая минимально фазирующего сигнала только от одного входного параметрона

$$u_{\phi} = k \cdot u_{уст}.$$

В этом же наиболее опасном случае следует предположить, что на всех параметронах, с которыми соединен выход данного, существовали колебания с противоположной фазой. Тогда напряжение последующего действия будет равно

$$u_{посл} = -k n u_{уст} e^{-\frac{\tau_{посл}}{T_3}}, \quad (3)$$

где $\tau_{посл} = \tau_u - 2\tau_{пер}$ — интервал времени от момента выключения подкачки на последующих параметронах до момента включения подкачки в данном параметроне,

τ_u — длительность импульса подкачки,

$\tau_{пер}$ — время перекрытия импульсов подкачки,

T_3 — постоянная времени контура параметрона после выключения подкачки.

Кроме того, $\tau_{посл} = \frac{2}{3} T_0 - \tau_u$, где T_0 — тактовый период. Для увеличения быстродействия необходимо сокращать длительность импульса подкачки. В предельном случае его длительность может быть равна длительности переднего фронта параметрических колебаний или несколько более его. Считаем, что $\tau_u = \alpha \tau_n$, где α коэффициент, близкий к 1.

Время перекрытия $\tau_{пер}$ следует выбирать возможно меньшим, чтобы уменьшить величину напряжения последующего действия за счет увеличения $\tau_{посл}$. Однако время перекрытия должно быть достаточным для того, чтобы фаза установившихся в параметроне колебаний определялась начальными условиями, т. е. за время перекрытия амплитуда

колебаний в параметроне должна нарасти до какой-то определенной величины, такой, чтобы выключение предыдущего параметрона не могло влиять на установившееся значение фазы. Обозначим эту величину $\beta u_{уст}$. Тогда из (1) получим

$$\omega\tau_{пер} = \frac{2}{\frac{1}{Q_p} - \frac{1}{Q_r}} \ln \frac{\beta u_{уст}}{u_{s0}}, \quad (4)$$

$$\omega\tau_{пол} = \omega\tau_u - 2\omega\tau_{пер} = \frac{2}{\frac{1}{Q_p} - \frac{1}{Q_r}} \ln \frac{u_{уст}^{\alpha-2}}{u_{s0}^{\alpha-2}\beta^2}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (3) и учитывая, что $T_3 = \frac{2L}{r} = \frac{2Q_p}{\omega}$, получим следующее выражение для напряжения последействия:

$$u_{пол} = -kn u_{уст} \left[\frac{u_{уст}^{\alpha-2}}{u_{s0}^{\alpha-2}\beta^2} \right]^{-\left(\frac{1}{\frac{Q_r}{Q_p}-1}\right)}. \quad (6)$$

Последний член суммы (2) $u_{ост}$ определяется для наиболее опасного случая соотношением

$$u_{ост} = -u_{уст} e^{-\frac{T_0 - \tau_u}{T_3}} = -u_{уст} e^{-\frac{2\tau_u - 3\tau_{пер}}{T_3}} = -u_{уст} \left[\frac{u_{уст}^{\alpha-3}}{u_{s0}^{\alpha-3}\beta^3} \right]^{-\left(\frac{1}{\frac{Q_r}{Q_p}-1}\right)}. \quad (7)$$

Для надежной работы параметрона необходимо, чтобы и в этом наиболее опасном случае вероятность сбоя была допустимой. Это будет в том случае, если $u_0 \geq \varepsilon$, где ε больше уровня шумов, но достаточно мало в сравнении с величиной $u_{уст}$ и определяется допустимой вероятностью сбоя. Если и предыдущие параметроны находятся в наихудших с точки зрения сбоя условиях, то $u_{s0} = u_0$.

Подставив в (2) значения $u_{ф}$, $u_{пол}$, $u_{ост}$ и обозначив $\gamma = \frac{u_{уст}}{u_{s0}}$, получим

$$k\gamma - kn\gamma \left[\frac{\gamma^{\alpha-2}}{\beta^2} \right]^{-\varphi} - \gamma \left[\frac{\gamma^{2\alpha-3}}{\beta^3} \right]^{-\varphi} = 1, \quad (8)$$

$$\text{где } \varphi = \frac{1}{\left(\frac{Q_r}{Q_p} - 1\right)}.$$

Пользуясь ранее полученными выражениями для τ_u и $\tau_{пер}$, легко определить тактовый период T_0 :

$$\omega T_0 = 3\omega(\tau_u - \tau_{пер}) = 6Q_r\varphi \ln \frac{\gamma^{\alpha-1}}{\beta} = 6Q_p(1 + \varphi) \ln \frac{\gamma^{\alpha-1}}{\beta}. \quad (9)$$

Задача состоит в том, чтобы с помощью выражений (8) и (9) выбрать параметры схемы (k, φ) таким образом, чтобы при заданных величинах $\varepsilon, \beta, n, Q_p$ величина тактового периода T_0 была минимальной. Это задача на отыскание экстремума функции двух переменных (например, k и φ), т. к. третья переменная α может быть выражена через эти две.

Из уравнения (8) определим значение α .

Введем обозначение

$$z = \left[\frac{\gamma^{\alpha-1}}{\beta} \right]^{-\varphi}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (8) приводится к квадратному уравнению относительно z

$$z^2 + knz + \frac{1 - k\gamma}{\gamma^{\varphi+1} \beta^{\varphi}} = 0, \quad (11)$$

откуда

$$z = -\frac{kn}{2} \pm \sqrt{\frac{k^2 n^2}{4} - \left(\frac{1 - k\gamma}{\gamma^{\varphi+1} \beta^{\varphi}} \right)}.$$

Знак „—“ перед корнем физического смысла не имеет, поэтому оставляем одно значение корня.

Подставив в (10) полученное для ωT_0 выражение, после несложных преобразований получим

$$\alpha = 1 - \frac{\ln \left(-\frac{kn}{2} + \sqrt{\frac{k^2 n^2}{4} - (1 - k\gamma) \gamma^{-(\varphi+1)} \beta^{-\varphi}} \right) + \varphi \ln \beta}{\varphi \ln \gamma}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в выражение (9) для ωT_0 имеем

$$\omega T_0 = 6Q_p \left\{ -\ln \left(-\frac{kn}{2} + \sqrt{\frac{k^2 n^2}{4} - (1 - k\gamma) \gamma^{-(\varphi+1)} \beta^{-\varphi}} \right) - 2\varphi \ln \beta \right\}. \quad (13)$$

Для частных значений параметров $k\gamma = 1, 1, \gamma = 50, \beta = 0,1$ и $n = 2$ зависимость $\frac{\omega T_0}{Q_p} = f\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)$ представлена на фиг. 1.

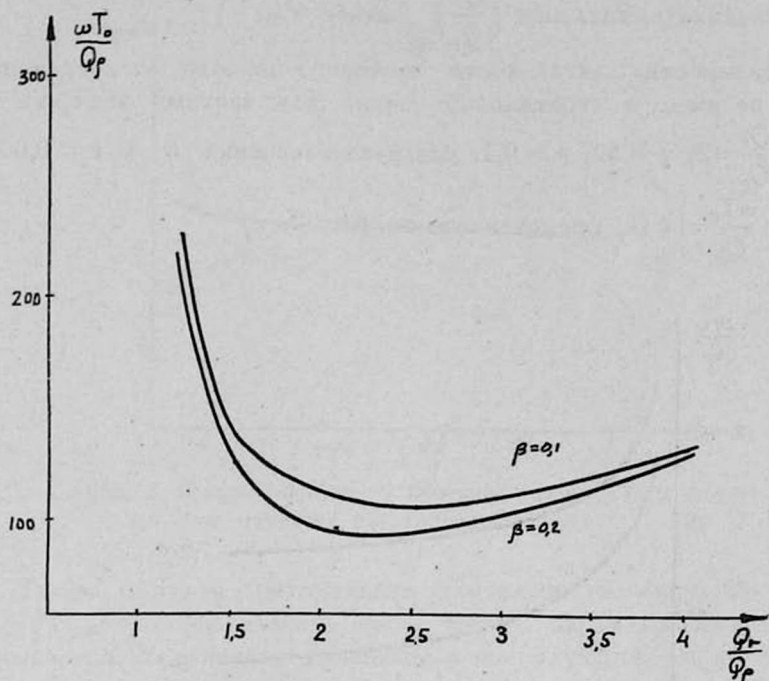
Из приведенного графика видно, что данная кривая имеет экстремальную точку, т. е. имеется оптимальное значение добротности, при котором тактовый период T_0 минимален.

Анализ на экстремум соотношения (13) приводит к следующему выражению для оптимального отношения добротностей:

$$\left(\frac{Q_r}{Q_p} \right)_{opt} = 1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{-2 \ln \beta} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 \ln \beta} \right)^2 + \left(1 + \frac{kn}{2e^{4/\ln^2 \gamma}} \right) \left(\frac{1}{-2 \ln \beta} \right)}}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что величина оптимальной добротности практически

не зависит от числа параметронов n , являющихся нагрузкой данного, т. к. $\frac{kn}{2e^{4/1n^2\gamma}} \ll 1$ в значительных пределах изменения числа n .



Фиг. 1 График зависимости величины $\frac{\omega T_0}{Q_p}$ от отношения добротностей.

Величина связи k также мало влияет на отношение $\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt}$. Значительнее в выражении (14) обнаруживается зависимость между $\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt}$ и коэффициентом β , определяющим устойчивое затягивание по фазе.

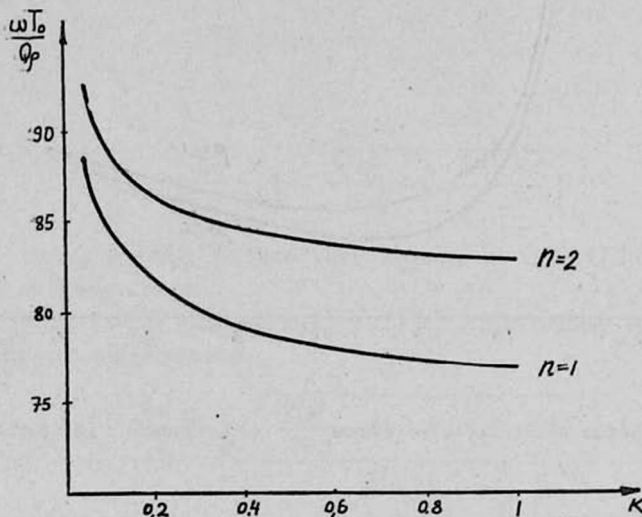
$$\text{При } \beta = 0,1, \quad \left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt} = 2,37.$$

$$\text{При } \beta = 0,2, \quad \left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt} = 2,05.$$

Для уменьшения вероятности сбоя параметрона величину β следует увеличивать. Это приводит к возрастанию коэффициента α и, соответственно длительности импульса подкачки τ_u и времени перекрытия $\tau_{пер}$. В этом случае устойчивое затягивание по фазе обеспечивается увеличением времени перекрытия между двумя подтактовыми импульсами подкачки, а оптимальное значение добротности $\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt}$ при этом несколько уменьшается.

Вычисление оптимальной добротности по формуле (14) дает хорошую точность. Для зависимости $\frac{\omega T_0}{Q_p} = f\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)$ (см. фиг. 1) при $\beta = 0,1$ ошибка вычисления $\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{opt}$ менее 4% .

Зависимость длительности тактового периода от коэффициента связи k не имеет экстремальной точки. Для частных значений параметров $\frac{Q_r}{Q_p} = 2$; $\gamma = 50$; $\beta = 0,1$, различных значений n и $k = 0,005 \div 1$ функция $\frac{\omega T_0}{Q_p} = \psi(k)$ представлена на фиг. 2.



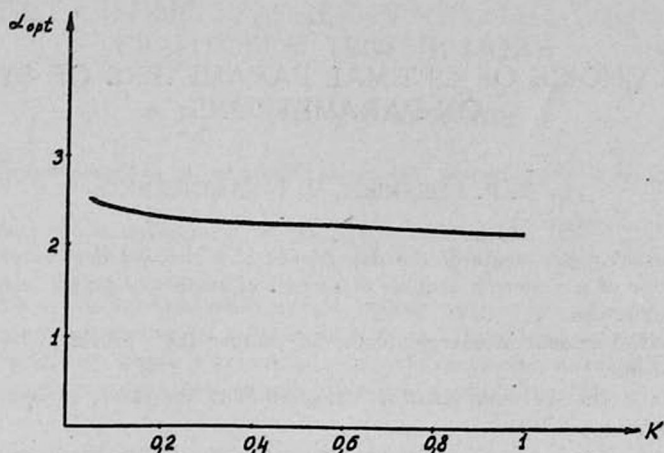
Фиг. 2. График зависимости длительности тактового периода от коэффициента связи.

С увеличением коэффициента связи длительность оптимального тактового периода уменьшается. Однако увеличение коэффициента связи до величин, превышающих $k = 0,1-0,15$, нецелесообразно, так как при этом увеличивается нагрузка на параметрон, ухудшаются условия его возбуждения, увеличивается потребляемая мощность, а быстродействие увеличивается весьма незначительно. При увеличении числа параметронов n на выходе данного быстродействия снижается. Однако характер кривой $\frac{\omega T_0}{Q_p} = \psi(k)$ при различных n не меняется.

Следовательно, можно для расчетов рекомендовать $k = 0,1-0,15$ при числе параметронов, нагруженных на данный, не превышающем двух.

Для определения коэффициента α_{opt} , определяющего длительность импульса подкачки, необходимо в выражение для α (12) подставить оптимальное значение φ .

При $\beta=0,1$, $\varphi_{opt}=0,731$; $\gamma=50$; $n=2$ и $k=0,05+1$ зависимость $\alpha_{opt}=\theta(k)$ представлена на фиг. 3. С увеличением коэффициента связи α_{opt} незначительно уменьшается.



Фиг. 3. График зависимости величины коэффициента α_{opt} от значения коэффициента связи k .

Таким образом, оптимальная длительность импульса подкачки $(\tau_n)_{opt} = \alpha_{opt} \cdot \tau_n$ с увеличением связи между параметронами несколько уменьшается. Устойчивые колебания в последующем параметроне при этом обеспечиваются за счет более сильной связи.

Пользуясь полученными соотношениями, можно оптимально выбрать параметры схемы на параметронах, а также параметры цепей подкачки.

Московский авиационный
институт

Поступила 31 мая 1966

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. И. Самойленко, Труды МАИ, выпуск 149, 1962.

ՊԱՐԱՄԵՏՐՈՆԱՅԻՆ ՄԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ՎՐԱ ՕՊՏԻՄԱԼ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ն. Պ. ՌՈՒՍԿԻՆ, Վ. Ի. ՍԱՄՈՅԼԵՆԿՈ

Աշխատանքում քննարկված է պարամետրոնների վրա հիմնված սարքավորումների արագազդեցության կախվածությունը պարամետրոնների կոնտուրների բարորակությունից, պարամետրոնների եղած կապի մեծություններից, սնման ամպլիտուդայից և այլն:

Գտնված է կոնտուրի բարորակության օպտիմալ արժեքը, որի դեպքում կարելի է ապահովել ամենամեծ արագազդեցությունը:

Ցույց է տրված, որ արագազդեցության մեծացման համար հարկավոր է պարամետրոնների միջև եղած կապի զործակիցը մեծացնել մինչև 0,1—0,15, կապի հետագա մեծացումը անպատակահարմար է:

Ցույն է տրված պարամետրոնային սխեմաների և հուսալիության կախվածությունը:

ON THE CHOICE OF OPTIMAL PARAMETERS OF SYSTEMS ON PARAMETRONS

by N. P. RUSSKIKH, V. I. SAMOILENKO

The present paper treats of the dependence of highspeed devices of parametrons on energy factor of parametron contour of amount of amplitude gadget connection between the parametrons.

The optimal amount of energy factor of contour that provides for the highest speed is found out.

The relationship between possible highspeed and the safety of systems on parametrons is shown.