

И. Я. ЖУРАВЛЕВ, канд. техн. наук, *А. И. ДОВНАРЬ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ СИГНАЛА В СХЕМАХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ФАКТОРУ ПЛОЩАДИ

Для построения формирователей синусоидальных напряжений используют нелинейные элементы — полевые транзисторы, полупроводниковые диоды, туннельные диоды, характеристики которых в определенной области близки к синусоиде. Важным моментом аппроксимации синусоидой близкой к ней кривой является определение оптимального коэффициента содряжения, обеспечивающего минимальный уровень искажений формируемого сигнала или заданный их спектральный состав, удобный для фильтрации высокочастотных компонент. Аналитическое решение этой задачи связано с определенными трудностями из-за сложности и приближенного характера моделей указанных приборов и в связи с необходимостью многократного разложения в ряд Фурье сформированных колебаний. Оптимизация схем данного класса по критерию минимума нелинейных искажений вызывает увеличение затрат машинного времени, поскольку необходимо использовать программы анализа схем в динамическом режиме и последующим спектральным анализом полученных характеристик.

Критерием точности согласования сформированной кривой с синусоидой может служить значение относительной разностной площади по модулю, описываемой последними на интервале углов $0 \leq \varphi \leq \pi/2$. Количественно различие между коэффициентом гармоник и относительным значением разностной площади уменьшается с возрастанием подобия синусоиды и характеристики форми-

рующего элемента. Так, для периодической последовательности симметричных треугольных импульсов с амплитудой A_{Δ} используемых в схемах формирователей в качестве исходных, на интервале $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ площадь $S_{\text{тр}} = A\pi/4$, а для синусоиды той же амплитуды $S_{\text{син}} = A$ и относительная разностная площадь

$$\Delta S_{\text{отн}} = \frac{S_{\text{син}} - S_{\text{тр}}}{S_{\text{син}}} = (1 - \pi/4) \approx 21,46 \%$$

Коэффициент гармоник треугольного напряжения симметричной формы, описываемого нечетным рядом гармоник с амплитудами, обратно пропорциональными квадрату их номера с учетом первых гармоник, включая 11, составляет 12,07588 %, а по третьей и пятой гармоникам — 11,809 % [1]. Таким образом, для этого случая весьма различающихся по форме колебаний различие между коэффициентом гармоник и относительной разностной площадью не превышает двух раз. Проводя аналогичное вычисление площади более близкого к синусоиде трапецеидального импульса с углом отсечки $\varphi_{\text{отс}} = \pi/3$ получаем $S_{\text{тран}} = A\pi/3$, $\Delta S_{\text{отн}} = 4,71975$ %. Гармонический ряд усеченного треугольного (трапецеидального) импульса содержит нечетные гармоники, за исключением кратных трем с амплитудами, обратно пропорциональными квадрату номера. Коэффициент его гармоник с учетом 5, 7, 11 и 13 гармоник равен 4,611692 %, т. е. весьма близок к вычисленной относительной разностной площади.

Характеристики приборов, используемых для построения формирователей синусоидального напряжения, незначительно отличаются от синусоиды, поэтому вычисление оптимального уровня входного сигнала по фактору площади должно давать приемлемый по точности результат. Простота и наглядность методики позволяют широко применять ее на практике. Задача несколько усложняется в случае пересечения кривых при их сведении к одному уровню в точке $\varphi_m = \pi/2$. Возможен случай, когда кривые описывают одинаковые площади, являясь по существу различными. В этом случае, очевидно, показателем нелинейности будет суммарная разностная площадь, вычисленная между точками пересечения кривых.

В качестве примера рассмотрим работу диодного формирователя синусоидального напряжения из треугольного. В простейшем случае схема представляет собой нелинейный делитель, верхним плечом которого является резистор R , а нижним — два включенных в разных направлениях согласованных по параметрам диода (рис. 1, а).

В окрестностях точки $\varphi = 0$ диоды практически закрыты и напряжение на них повторяет входное, формируя начальный (линейный) участок синусоиды. Повышение уровня входного напряжения приводит к открыванию диодов и нарушению линейности характеристики аналогично изменению наклона синусоиды при возрастании угла. Чтобы избежать затруднений, связанных с расчетом нелинейного делителя, питаемого от источника вход-

ного напряжения $V_{вх}$, перейдем к эквивалентной ему схеме параллельного соединения диодов и резистора, питаемого током $I_{вх}$ (рис. 1, б). Принимая идеализированную модель диода и пренебрегая его обратным током I_0 , а также выполняя обычные допущения, присущие характеристике диода в прямом направлении [2], запишем

$$I_{вх}(U_D) = I_R + I_D \frac{U_D}{R} + I_0 e^{\frac{U_D}{\varphi_T}}. \quad (1)$$

Здесь φ_T — температурный потенциал, $\varphi_T = 26$ мВ; U_D — напряжение на диодах, зашунтированных резисторами при протекании тока $I_{вх}$.

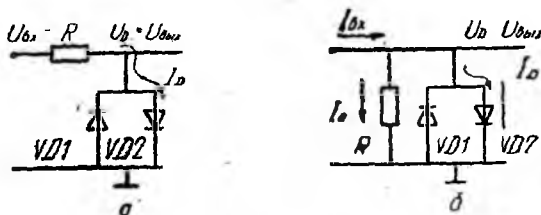


Рис. 1

Площадь, описываемая кривой тока при изменении U_D от 0 до его максимального (амплитудного) значения U_{Dm} может быть представлена следующей формулой:

$$S_I = \int_0^{U_{Dm}} I_{вх} dU_D = \frac{U_{Dm}^2}{2R} + \varphi_T \left(I_0 e^{\frac{U_{Dm}}{\varphi_T}} - I_0 \right). \quad (2)$$

Приведенная площадь S_I , необходимая для сравнения с площадью, описываемой синусоидой

$$S_{I_{прив}} = \frac{\pi}{2I_{вх.г}} \left(\frac{U_{Dm}^2}{2R} + \varphi_T I_0 e^{\frac{U_{Dm}}{\varphi_T}} \right), \quad (3)$$

где $I_{вх.г}$ — сила входного тока, соответствующая амплитудному значению напряжения на диодах. Вводя в выражение (3) силы токов резистора I_{Rm} и открытого диода I_{Dm} , получаем

$$S_{I_{прив}} = \frac{\pi}{4} U_{Dm} \left(\frac{I_{Rm}}{I_{вх.г}} + \frac{2\varphi_T}{U_{Dm}} \frac{I_{Dm}}{I_{вх.г}} \right). \quad (4)$$

Поскольку кривая $I_{вх}(U_D)$ близка к кривой $\arcsin \frac{U_D}{U_{Dm}}$, вычисляем площадь, описываемую последней на интервале $0 \leq \frac{U_D}{U_{Dm}} \leq 1$

$$S_{arc} = U_{Dm} \int_0^1 \arcsin \left(\frac{U_D}{U_{Dm}} \right) d \left(\frac{U_D}{U_{Dm}} \right) = \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) U_{Dm}. \quad (5)$$

Приближенное значение коэффициента гармоник определяется относительной разностной площадью

$$K_{\Gamma} \approx \Delta S_{\text{отн}} = \frac{S_{\text{arc}} - S_{\text{прив}}}{S_{\text{sin}}} = \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) - \frac{\pi}{4} \left(\frac{I_{Rm}}{I_{\text{вх.т}}} + \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}} \frac{I_{Dm}}{I_{\text{вх.т}}} \right). \quad (6)$$

При пересечении кривых вначале отыскиваются координаты точки пересечения $U_{D\text{пер}}$, $I_{R\text{пер}}$, $I_{D\text{пер}}$, угол $\varphi_{\text{пер}} = \frac{\pi I_{\text{вх.пер}}}{2 I_{\text{вх.т}}}$, а затем вычисляется разностная площадь на участке от начала координат до точки пересечения

$$\Delta S_1 = S_{\text{arc}} - S_{\text{Iвх}} = U_{Dm} \int_0^{\frac{U_{D\text{пер}}}{U_{Dm}}} \arcsin \left(\frac{U_{D\text{пер}}}{U_{Dm}} \right) d \left(\frac{U_{D\text{пер}}}{U_{Dm}} \right) - \int_0^{U_{D\text{пер}}} I_{\text{вх}}(U_D) dU_D \quad (7)$$

и разностная площадь между точкой пересечения и вершиной синусоиды

$$\Delta S_2 = S_{2I_{\text{вх}}} - S_{2\text{arc}} = \int_{U_{D\text{пер}}}^{U_{Dm}} I_{\text{вх}}(U_D) dU_D - \int_{\frac{U_{D\text{пер}}}{U_{Dm}}}^1 U_{Dm} \arcsin \times \left(\frac{U_D}{U_{Dm}} \right) d \left(\frac{U_D}{U_{Dm}} \right). \quad (8)$$

После некоторых преобразований получаем выражение для относительной разностной площади

$$\Delta S_{\text{отн}} = \frac{\Delta S_1 + \Delta S_2}{S_{\text{sin}}} = 2(\varphi_{\text{пер}} \sin \varphi_{\text{пер}} + \cos \varphi_{\text{пер}}) - \left(\frac{\pi}{2} + 1 \right) + \frac{\pi}{4 I_{\text{вх.т}}} \left[I_{Rm} - \frac{2U_{D\text{пер}}}{U_{Dm}} I_{R\text{пер}} + \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}} (I_{Dm} - 2I_{D\text{пер}}) \right] 2I_{D\text{пер}}. \quad (9)$$

Аналогично строится выражение для $\Delta S_{\text{отн}}$ при пересечении кривых в двух точках.

Формула (6) позволяет найти соотношение между I_{Rm} и I_{Dm} , обеспечивающее минимум искажений сформированного напряжения. Очевидно, это условие соответствует равенству площадей $S_{\text{прив}}$, S_{arc} . Отсюда

$$\frac{I_{Rm}^{\text{опт}}}{I_{\text{вх.т}}} = \left(2 - \frac{4}{\pi} \right) - \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}} \frac{I_{Dm}^{\text{опт}}}{I_{\text{вх.т}}} \quad (10)$$

или, учитывая, что $I_{Dm} = I_{\text{вх.т}} - I_{Rm}$, получаем

$$\frac{I_{Rm}^{\text{опт}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2 - 4/\pi - \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}}}{1 - \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}}} = \frac{0,72676 - \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}}}{1 - \frac{2\varphi_{\Gamma}}{U_{Dm}}}. \quad (11)$$

Параметр $\frac{I_{Rm}}{I_{вх.т}}$, представляющий относительное значение линейной компоненты, в амплитудном значении входного тока может быть назван коэффициентом сопряжения. В соответствии с этим выражение (6) может быть переписано в виде

$$K_r \approx (\pi/2 - 1) - \pi/4 \left[K_c + \frac{2\varphi_T}{U_{Dm}} (1 - K_c) \right], \quad (12)$$

где K_c — коэффициент сопряжения, $K_c = \frac{I_{Rm}}{I_{вх.т}}$.

Согласно (10) оптимальное значение коэффициента сопряжения существенно зависит от величины U_{Dm} . Интересен случай, когда $\varphi_T / U_{Dm} = 0,2480618$ и $K_c^{opt} = 2/\pi$, как у синусоиды. Существенно, что количество точек пересечения кривых при их оптимальном сопряжении зависит от величины K_c^{opt} . Для $K_c^{opt} \leq 2/\pi$ характерно пересечение кривых в одной точке на интервале $0 < \varphi < \pi/2$. На начальном участке характеристика диода, зашунтированного резистором, идет выше синусоиды (рис. 2, кривая 4), затем пересекает ее и после некоторого «провисания» совпадает с ней в точке $\varphi_{max} = \pi/2$ (рис. 2, кривая 1, $K_c = 0,5$). Таким образом, при $K_c^{opt} \leq 2/\pi$ уточненное значение коэффициента гармоник в точке оптимума может быть вычислено по формуле (9).

Для $K_c^{opt} > 2/\pi$ характерно пересечение кривых в точках А, В (рис. 2). Максимальное значение K_c^{opt} соответствует условию $U_{Dm} \gg \varphi_T$, но этот режим неприемлем, поскольку с увеличением U_{Dm} диод заходит в омическую область. Омическое сопротивление базы начинает сказываться при силе тока $I_{Dm} \geq \text{мА}$ [3].

Кривая 2 ($K_c^{opt} = 0,7$) рассчитана для отношения $\frac{2\varphi_T}{U_{Dm}} = 0,1$, характерного для кремниевых диодов (рис. 2). Точки пересечения А, В соответствуют углам $\varphi_{пер1} = 0,73024$ рад и $\varphi_{пер2} = 1,33067$ рад, а коэффициент гармоник, вычисленный по модулю разностной площади,

$$K_r^{opt} = \frac{\Delta S_1 + |\Delta S_e| + \Delta S_3}{S_{\sin}} = \frac{2|S_2|}{S_{\sin}} = 2,43 \%$$

Если осуществить тщательное сопряжение и симметрирование схемы, удастся получить в случае $U_{Dm} = 0,5$ В экспериментальное значение K_r^{opt} , несколько меньшее 2%. В точках, отличных от оптимума, коэффициент гармоник может быть также вычислен по модулю разностной площади, однако для его определения при различных значениях U_{Dm} необходимо предварительно отыскивать точки пересечения, а затем интегрировать кривые на интервалах

$$0 \leq \varphi \leq \varphi_{пер1}; \quad \varphi_{пер1} \leq \varphi \leq \varphi_{пер2}; \quad \varphi_{пер2} \leq \varphi \leq \pi/2.$$

При $U_{Dm} \neq U_{Dm}^{opt}$ нарушается равенство разностных площадей ΔS_1 , ΔS_2 или ΔS_3 исчезает вовсе (рис. 2, кривая 3, $K_c = 0,8$) и

расчет коэффициента гармоник с учетом точек пересечений теряет смысл.

В силу сказанного в точках, удаленных от оптимальной, вычисление K_r с приемлемой точностью может быть произведено по формуле (6).

Имея значения U_{Dm} , I_{Dm} для параллельной цепи, состоящей из диода и резистора R (рис. 1, б), нетрудно перейти к схеме последовательного формирователя (рис. 1, а), содержащей те же резистор и диоды. Входное напряжение в этом случае определяется выражением $U_{вх.г} = U_{Dm} + I_{Dm}R$ (13).

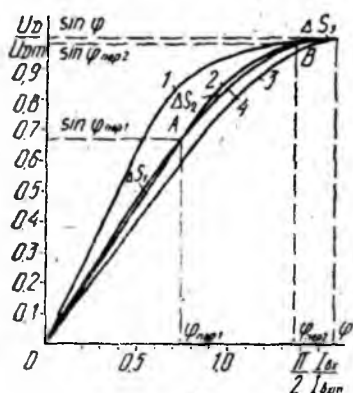


Рис. 2

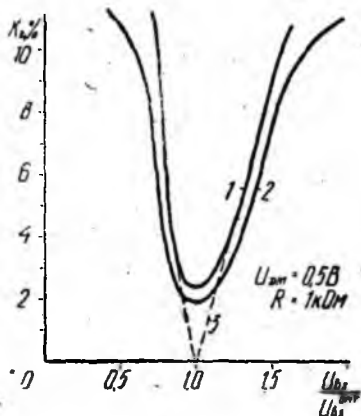


Рис. 3

Графики расчетной и экспериментальной зависимостей $K_r = f(U_{вх})$ представлены на рис. 3. Кривая 2 снята экспериментально для диодов Д220, питаемых через резистор $R = 1$ кОм. Можно констатировать удовлетворительное совпадение кривых, за исключением точки оптимума, определяемой условием (10), где уточненное значение коэффициента гармоник найдено по модулю разностной площади с учетом отмеченных точек пересечения А, В. В точках, удаленных от оптимума, расхождение кривых возрастает, что обусловлено различными предельными значениями коэффициента гармоник и относительной разностной площади. В пределе, когда $K_c \rightarrow 1$, выходное напряжение, как отмечалось, приобретает треугольную форму с коэффициентом гармоник, близким к 12 %, а предельное значение $\Delta S_{отн} = 21,5$ %. В другом крайнем случае при $K_c \rightarrow 0$ выходное напряжение определяется характеристикой диода, имеющей экспоненциальный характер. Расхождение расчетных и экспериментальных значений K_r в области оптимума обусловлено погрешностью самого метода и допущенными упрощениями (пренебрежение обратным током диода I_0 и т. п.). Последние не являются принципиальными и могут быть исключены.

По кривым, в частности, можно установить высокую чувствительность устройства к изменению уровня входного сигнала. От-

клонение амплитуды входного напряжения на 20 % от оптимума приводит к удвоению коэффициента гармоник. Требование высокой стабильности уровня входного сигнала присуще схемам функциональных преобразователей вообще. Применительно к диодному формирователю снизить чувствительность к изменению амплитуды входного сигнала можно рациональным увеличением R .

Фактор разностной площади позволяет произвести анализ температурной нестабильности схем формирователей, являющейся одним из недостатков последних. Специфичность задачи требует отдельного исследования.

Список литературы: 1. Щербаков В. И., Грездов Г. И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник.—К.: Техніка, 1983.—213 с. 2. Агаханян Т. М. Основы транзисторной электроники.—М.: Энергия, 1974.—256 с. 3. Справочник по нелинейным схемам: Пер. с англ. / Под ред. Д. М. Шейнголда.—М.: Мир, 1977.—524 с.

Поступила в редколлегию 30.10.85.