А. А. ЛЫСЕНКО, к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия, г. С.-Петербург, ООО «Эремекс»
E-mail: info@eremex.com

Дата поступления в редакцию
23.07 2009 г.

Оппонент *д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН*
(ООО «Прософт-Технолоджи, г. С.-Петербург)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОЙ ДЛИНЫ ПРОВОДНИКОВ В САПР TopoR

В статье приведены математические модели и алгоритмы расчета формы проводников заданной длины, вписанных в произвольную трапецию.

Быстродействие вычислительной техники постоянно возрастает. При этом современные компьютеры, как и прежде, состоят из блоков синхронной логики, управляемых централизованной системой тактовой синхронизации.

В высокоскоростной цифровой электронике требуется минимизировать расфазировку тактовых сигналов в точках приема. Для этого недостаточно просто протянуть ко всем точкам сети линии передачи одинаковой длины, необходимо еще, чтобы все эти трассы имели одинаковую задержку. Отметим, что, например, дорожки на внешних сторонах платы (микрополосковые дорожки) обеспечивают более высокую скорость распространения сигнала по сравнению с дорожками на внутренних слоях (или полосковыми дорожками). Кроме того, необходимо единообразно согласовать линии синхронизации и обеспечить одинаковые оконечные нагрузки. От того, насколько полно будут выполнены эти три требования, зависит точность согласования линий синхронизации.

Для решения первой задачи (обеспечение одинаковых задержек) необходимо иметь средства автоматического создания проводников заданной длины и механизмы синхронизации длины проводников.

Одной из задач при проектировании высокочастотных печатных плат является задача выравнивания длины проводников в группе цепей. Обычно она решается путем увеличения длины более коротких проводников. Однако, во-первых, для такого увеличения необходимо иметь достаточно свободного пространства, а во-вторых, в ряде случаев это может сопровождаться увеличением длины и более длинных проводников, которые необходимо отодвинуть, чтобы обеспечить необходимое пространство для размещения добавленных сегментов коротких.

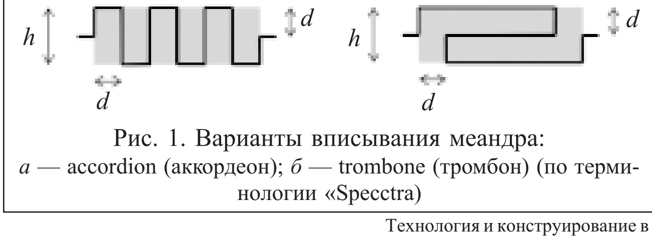

Рис. 1. Варианты вписывания меандра:
а — accordion (аккордеон); *б* — trombone (тромбон) (по терминологии «Specctra)

Увеличение длины проводников обычно осуществляется вписыванием меандра в некоторую, например прямоугольную, область.

На **рис. 1** приведены два варианта вписывания меандра в прямоугольную область, которые применяются в системе «Specctra» [1].

Здесь, уменьшая d, можно при тех же h и l значительно увеличивать длину проводника L. Однако уменьшение d имеет определенные пределы, связанные как с шириной проводника w, так и с минимальным зазором, при котором не возникает проблем с целостностью сигнала. Обычно d не меньше $3w$, поэтому получить сколь угодно большую длину на достаточно малой площади не удается.

При трассировке только по ортогональным направлениям (горизонтальном и вертикальном) неэффективно используются ресурсы монтажного пространства. Так называемая диагональная трассировка (под углом 45°) позволяет не только сократить суммарную длину соединений, но и при тех же проектных нормах высвободить ресурсы монтажного пространства. Однако в этом случае при заполнении непрямоугольных площадей прямоугольными областями для выравнивания длины проводников неизбежны потери площади, как показано на **рис. 2** — серым цветом здесь выделены неиспользуемые области. Кроме того,

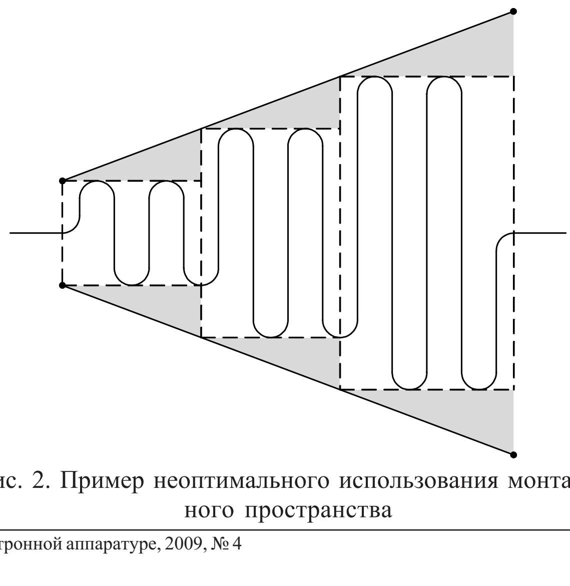

Рис. 2. Пример неоптимального использования монтажного пространства

при аппроксимации непрямоугольных областей прямоугольниками требуется решить задачу выбора оптимальных размеров прямоугольников с учетом кратности этих размеров величине полупериода меандра. Очевидно, что при использовании области в виде трапеции монтажное пространство будет использоваться более эффективно (на той же площади можно обеспечить большую длину).

САПР «TopoR» [2—3] осуществляет автоматическую гибкую топологическую трассировку соединений в произвольных направлениях (не только под углами 90° и 45°). В САПР «TopoR» можно обеспечить большую эффективность использования ресурсов коммутационного пространства за счет использования непрямоугольных областей для выравнивания длины проводников.

Как говорилось выше, наиболее часто используемый способ выравнивания длины проводников при проектировании высокочастотных печатных плат — это увеличение длины более коротких проводников. Чтобы увеличить длину того или иного проводника необходимо иметь возможность регулировать длину сегментов, составляющих проводник. Для этого фрагмент проводника заменяется областью, в которую вписывается некоторая ломаная линия, обеспечивающая получение требуемой для данного сегмента проводника длины.

На **рис. 3** приведен пример для случая, когда ограничивающей областью является трапеция, а в качестве вписываемой в эту область ломаной линии — «серпантин». (В некоторых САПР [4] для обозначения сегментов подобной формы используется понятие *serpentine* (с англ. — змеевидный, змееподобный). Далее для описания подобных кривых будем использовать понятие «*змейка*».)

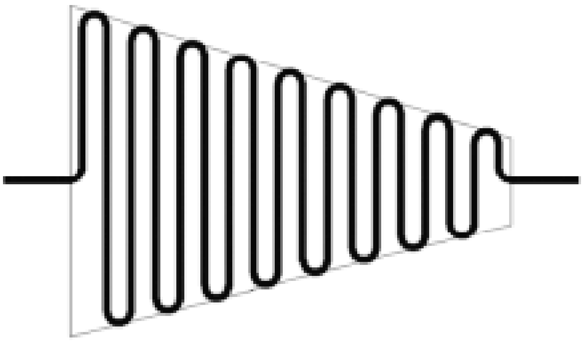

Рис. 3. «Серпантин», вписанный в трапецию

Змейка представляет собой набор последовательно идущих друг за другом прямолинейных и дугообразных (рис. 3) либо аппроксимированных отрезками прямых (**рис. 4**) участков проводников.

Змейка вписывается в заданную трапецию, при этом расчет точек касания змейки и трапеции производится без учета толщины проводников — считается, что сторон трапеции касаются середины проводников, а не их края. Змейка может быть дополнена отрезком прямой, если высота трапеции составляет не целое число полупериодов (см. рис. 4, слева).

Высота трапеции, длина оснований и углы наклона боковых сторон трапеции регулируются пользователем. В трапецию вписывается змейка необходимой длины (с заданным зазором между проводниками) в случае если пространства достаточно, и максимально возможной длины — если пространства недостаточно.

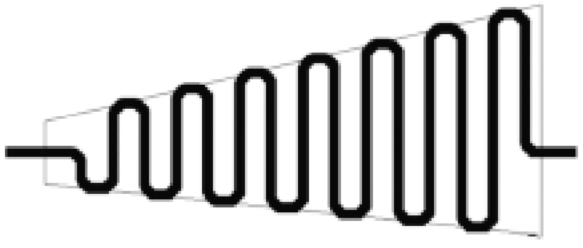

Рис. 4. Змейка с аппроксимированными дугообразными участками

На **рис. 5** показан общий вид трапеции с точками, с помощью которых пользователь регулирует параметры трапеции. Здесь B и F — точки подключения проводника («вход» и «выход» трапеции). Отрезки AC и EG всегда перпендикулярны оси BF.

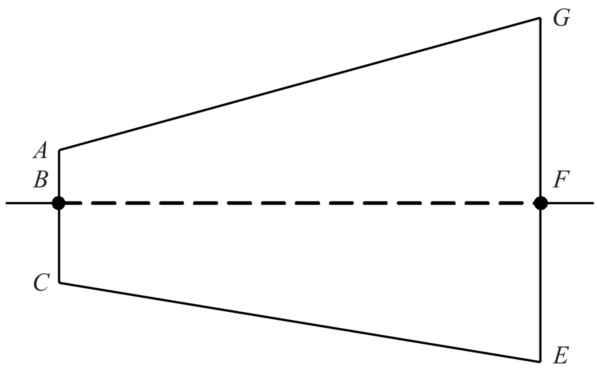

Рис. 5

Если параметры трапеции и требуемая длина змейки соотносятся так, что корректную змейку создать невозможно (требуемая длина слишком мала, и змейка не может быть создана как последовательность дугообразных и прямолинейных участков), то создается одна из «закритических» змеек. Дугообразные участки в таких змейках всегда аппроксимированы. Закритические змейки могут быть трех видов, и при уменьшении требуемой длины эти виды сменяют друг друга. Критерием для перехода от одного вида к другому является критическая длина змейки — первая критическая длина, вторая или третья, которые описаны ниже.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗМЕЙКИ

Исходными данными при создании змейки являются параметры трапеции, в которую должна быть вписана змейка, ширина проводника, зазор между проводниками внутри змейки (причем зазор — это расстояние между краями проводников, а не их серединами) и признак аппроксимации, указывающий, должны ли дугообразные участки змейки быть аппроксимированы отрезками прямых или нет. Параметры трапеции задаются координатами точек A_0, B_0, C_0, E_0, F_0, G_0 на **рис. 6**.

Для расчета формы змейки по заданной длине необходимо рассчитать ряд дополнительных парамет-

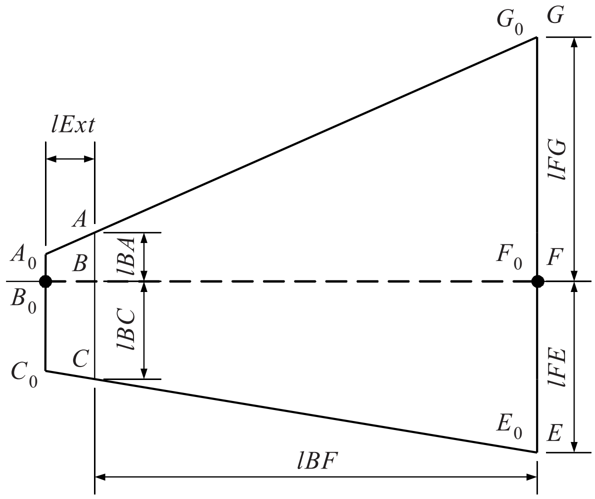

Рис. 6

ров: величину полупериода d, высоту трапеции lBF, количество полупериодов n и избыток высоты трапеции $lExt$.

Величина полупериода d вычисляется как сумма толщины проводника и зазора между проводниками внутри змейки (**рис. 7**).

Точки B_0 и F_0 — это точки «входа» и «выхода», соответственно; изначально точки B и F считаются совпадающими с исходными точками. Зная их координаты, можно найти исходную высоту трапеции — расстояние между точками входа и выхода lBF. Именно эта величина определяет минимально возможную длину змейки в заданной трапеции $lenMin$ — предельный случай, когда змейка вырождается в отрезок прямой.

Следующий важный параметр — количество полупериодов, «умещающихся» в трапеции, которое вычисляется как

$$n = \left\lfloor \frac{lBF}{d} \right\rfloor. \qquad (1)$$

Как видно на **рис. 8**, один из полупериодов расходуется на «вход» и «выход» змейки — по половине величины d на каждый из них.

Таким образом, фактическое число изгибов (без учета входа и выхода) в змейке равно n–1. Это означает, что змейка может быть создана только если число полупериодов n не меньше двух, т. е. когда существует хотя бы один изгиб. В противном случае максимальная длина змейки ($lenMax$) считается равной минимальной, и змейка отображается как отрезок прямой.

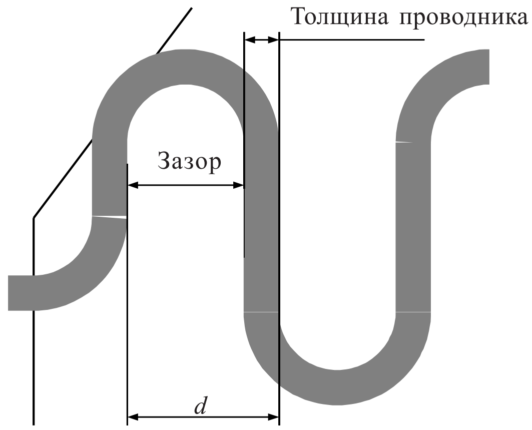

Рис. 7

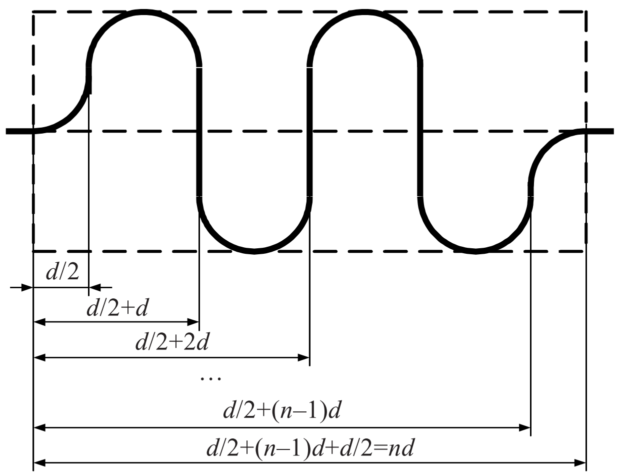

Рис. 8. Полупериоды змейки

Высота трапеции может быть не равна целому числу полупериодов. На рис. 6 отмечена величина $lExt$, которую будем называть избытком высоты трапеции. Она характеризует длину отрезка, которым дополняется змейка в исходной трапеции, и равна остатку от деления lBF на d. Очевидно, что эта длина всегда меньше, чем длина полупериода. В случае $lExt>0$ необходимо скорректировать исходную трапецию и привести ее к виду, обозначенному на рис. 6 точками A, B, C, E, F, G.

Корректировка трапеции производится путем «сжатия» к большему из оснований. Если левое основание меньше правого, то точки A, B и C (изначально совпадающие с точками A_0, B_0, C_0) сдвигаются по отрезкам AG, BF и CE к противоположным концам. Если левое основание не меньше правого, то сдвигаются точки E, F, G. Соответственно, величина lBF также корректируется — она уменьшается на величину избытка высоты трапеции и ей присваивается новое значние $lBF=lBF–lExt$.

Во всех дальнейших расчетах используются параметры трапеции, обозначенные скорректированными точками A, B, C, E, F, G. Вычисление длины змейки всегда будет производиться с учетом избытка высоты трапеции, т. е. с учетом дополняющего змейку отрезка.

После расчета значений lBA, lBC, lFE, lFG минимальное из них сравнивается с длиной полупериода — его величина должна быть не меньше полупериода. Если это не так, то точки, не удовлетворяющие условию (A, C, E или G), корректируются таким образом, чтобы каждая из величин lBA, lBC, lFE, lFG была не меньше величины полупериода. Цель такой корректировки — обеспечить возможность построения корректных змеек для значений длины, превышающих критические.

Далее необходимо выбрать направление змейки — направление первого изгиба после входа (вверх или вниз). Оно выбирается таким, при котором достигается максимально возможная длина змейки.

Длина змейки в трапеции

На **рис. 9** показана область, в которой требуется рассчитать длину змейки. Она совпадает с трапецией и состоит из прямоугольника и двух треугольников. Таким образом, длина змейки в трапеции — это сумма длины змейки в прямоугольнике и добавок ее длины в верхнем и нижнем треугольниках.

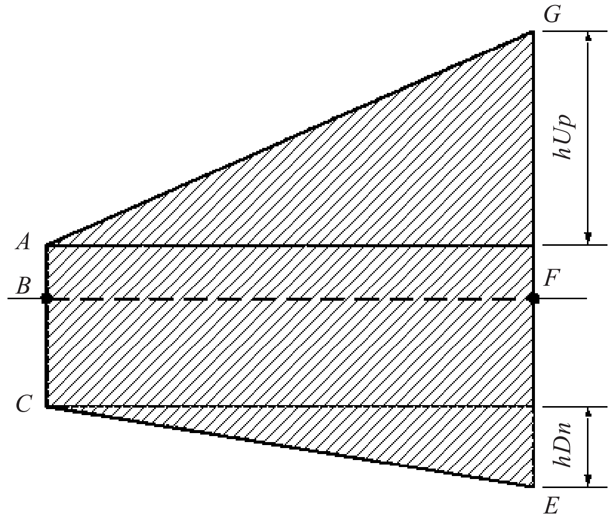

Рис. 9. Области, в которых рассчитывается длина змейки

Длина змейки в прямоугольнике

За длину змейки в прямоугольнике принимается длина змейки, вписанной в прямоугольник, выделенный на **рис. 10**.

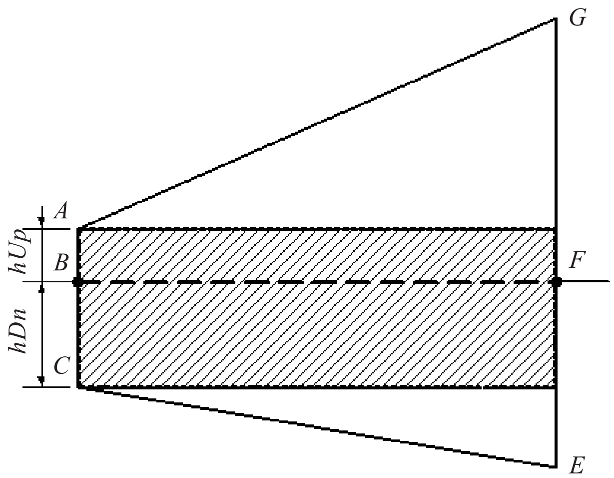

Рис. 10. Область, в которой рассчитывается длина змейки

По количеству изгибов змейки в верхней и нижней части прямоугольника будем различать симметричный и несимметричный случаи (**рис. 11**).

Для вычисления длины змейки необходимо знать длину ее дугообразного участка — «шапочки».

Длина «шапочки» (*lenHat*) для змейки без аппроксимации (**рис. 12**, *а*) вычисляется как половина длины окружности:

$$lenHat = d\,\frac{\pi}{2}, \tag{2}$$

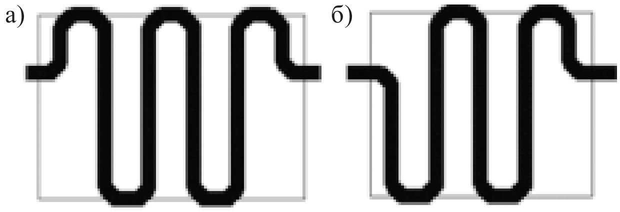

Рис. 11. Змейка, вписанная в прямоугольник:
а — несимметричный случай; *б* — симметричный

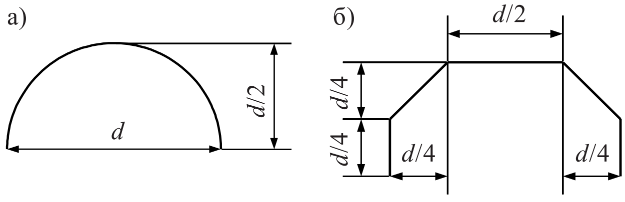

Рис. 12. «Шапочки» изгибов:
а — без аппроксимации; *б* — с аппроксимацией

а для случая с аппроксимацией (рис. 12, *б*) — как сумма длин отрезков, составляющих «шапочку»:

$$lenHat = d(1+\frac{\sqrt{2}}{2}). \tag{3}$$

Если суммарную длину прямолинейных участков змейки вычислить как (*hUp*+*hDn*)(*n*–1), то, чтобы получить длину змейки, необходимо исключить из рассмотрения показанные на **рис. 13** пунктиром отрезки, заменив их длиной «шапочек». Таким образом, для каждого изгиба из общей длины следует

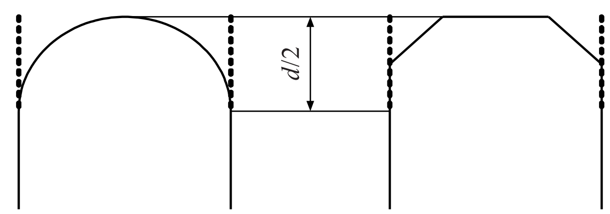

Рис. 13. Заменяемые при расчете длины участки изгибов

вычесть величину, равную *d*, и прибавить величину, равную *lenHat*. Формула расчета длины змейки, вписанной в прямоугольник, для симметричного случая (см. рис. 11, б) имеет следующий вид:

$$len = (hUp + hDn)(n-1) + (lenHat - d)n. \tag{4}$$

Для несимметричного случая это значение требует уточнения, т. к. сумма длин крайних прямолинейных участков отличается от длины остальных отрезков. Несимметричный случай наблюдается тогда, когда число полупериодов четно. Формула для расчета длины такой змейки зависит от направления змейки в прямоугольнике:

$$len = \begin{cases} len + (hUp - hDn), \\ \quad \text{если флаг } bUp \text{ установлен,} \\ len + (hDn - hUp), \\ \quad \text{если флаг } bUp \text{ не установлен,} \end{cases} \tag{5}$$

где *bUp* — флаг направленности змейки вверх.

При расчете длины змейки в прямоугольнике также необходимо учесть избыток высоты трапеции.

Таким образом, длина змейки в выделенном прямоугольнике — это сумма длины, рассчитанной по формуле (4) или (5), и избытка высоты трапеции.

Максимально возможная добавка длины змейки в верхнем треугольнике

На **рис. 14** показаны варианты расположения треугольников в трапеции. Расчет максимально возможных добавок для верхнего и нижнего треугольников производится независимо.

Когда змейка вписывается в трапецию, увеличивается длина прямолинейных участков змейки, вписанной в прямоугольник. Максимально возможная добавка в треугольнике — это величина, на которую увеличилась длина всех прямолинейных участков, смежных с «шапочками», касающимися гипотенузы треугольника.

Для случаев с аппроксимацией и без нее вычисления будут различны, поэтому каждый из них будет рассмотрен отдельно.

Исходными данными для расчета верхнего треугольника являются следующие (см. рис. 6):

— высота треугольника h (модуль разности lBA и lFG);

— длина основания треугольника w (равна lBF);

— признак направленности змейки вверх (bUp);

— признак направления гипотенузы треугольника $bDirNO$ (принимает значение «истина» в том случае, когда прямой угол треугольника находится справа, т. е. когда lFG больше lBA).

Рассмотрим *случай без аппроксимации.*

На **рис. 15** выделены отрезки, составляющие добавку длины от первого изгиба в треугольнике.

Длину каждого из этих отрезков можно найти как результат выражения $A_1P–O_1A_1+OP$. Тогда добавка длины от первого изгиба вычисляется по формуле

$$dL_1=2\left(A_1P-O_1A_1+OP\right)=2x_1\frac{h}{w}-d\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{w}+d. \quad (6)$$

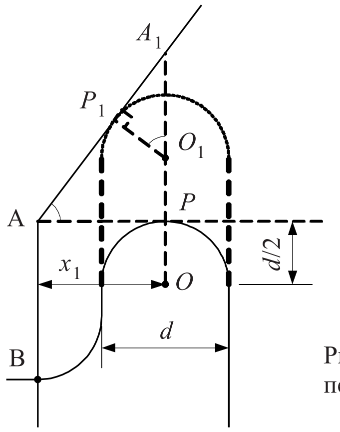

Рис. 15. Добавка длины от первого изгиба без аппроксимации

Здесь только величина x_1 характерна именно для первого изгиба змейки в треугольнике, следовательно полную добавку длины змейки в треугольнике можно представить как

$$dL=\sum_{i=1}^{k}dL_i=\sum_{i=1}^{k}\left(2x_i\frac{h}{w}-d\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{w}+d\right)=$$

$$=\frac{2h}{w}\sum_{i=1}^{k}x_i-kd\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{w}+kd, \quad (7)$$

где k — число изгибов в треугольнике;
dL_i — добавка длины от i-го изгиба;
x_i — расстояние от вершины треугольника до оси i-го изгиба.

Так как последовательность x_i — это арифметическая прогрессия с шагом $2d$, формулу (7) можно записать как

$$dL=\frac{2h}{w}k(x_1+d(k-1))-kd\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{w}+kd=$$

$$=k\left(\frac{2h}{w}(x_1+d(k-1))-d\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{w}+d\right).$$

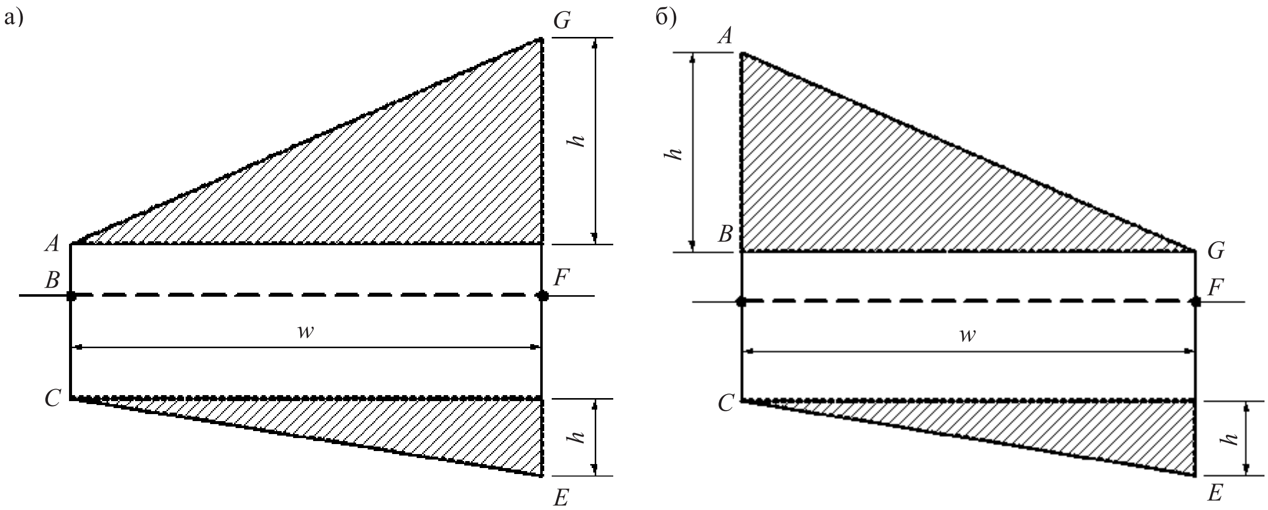

Рис. 14. Варианты взаимного расположения треугольников, в которых рассчитываются максимальные добавки к длине

Учитывая, что $w=nd$, получим

$$dL = k\left(\frac{2h(x_1 + d(k-1))}{nd} - \frac{d\sqrt{w^2+h^2}}{nd} + \frac{w}{n}\right) =$$
$$= \frac{k}{n}\left(2h\left(\frac{x_1}{d} + k - 1\right) - \sqrt{w^2+h^2} + w\right). \qquad (8)$$

В **табл. 1** приведены параметры змейки и величины, входящие в формулу (8).

Данные, представленные в табл. 1, позволяют привести формулу (8) к виду, удобному для вычислений. При этом необходимо учесть, что добавка длины в треугольнике будет ненулевой только тогда, когда величина x_1/d меньше n (т. е. когда имеется хотя бы один изгиб).

В результате получим обобщающую формулу для расчета максимальной добавки длины змейки в треугольнике в случае без аппроксимации

$$\left.\begin{aligned}
&kDivN = \begin{cases} \dfrac{n-1}{2n}, \text{ если } n \text{ нечетно}, \\ 0{,}5, \text{ если } n \text{ четно и установлен флаг } bUp, \\ \dfrac{n-2}{2n}, \text{ если } n \text{ четно и не установлен флаг } bUp; \end{cases} \\
&xd = \begin{cases} n, \text{ если } n \text{ четно}, \\ n-1, \text{ если } n \text{ нечетно и } bUp = bDirNO, \\ n+1, \text{ если } n \text{ нечетно и } bUp \neq bDirNO; \end{cases} \\
&dL = kDivN\left(xd \cdot h - \sqrt{w^2+h^2} + w\right).
\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

Таблица 1

Соотношения параметров змейки в верхнем треугольнике для случая без аппроксимации

bUp	*n*	*bDirNO*	*k*	x_1/d	$(x_1/d+(k-1))\cdot 2$	Иллюстрация
да	четно	да (/)	*n*/2	1	*n*	**рис. 16**, *а*
да	четно	нет (\)	*n*/2	1	*n*	рис. 16, *б*
да	нечетно	да (/)	(*n*–1)/2	1	*n*–1	рис. 16, *в*
да	нечетно	нет (\)	(*n*–1)/2	2	*n*+1	рис. 16, *г*
нет	четно	да (/)	(*n*–2)/2	2	*n*	**рис. 17**, *а*
нет	четно	нет (\)	(*n*–2)/2	2	*n*	рис. 17, *б*
нет	нечетно	да (/)	(*n*–1)/2	2	*n*+1	рис. 17, *в*
нет	нечетно	нет (\)	(*n*–1)/2	1	*n*–1	рис. 17, *г*

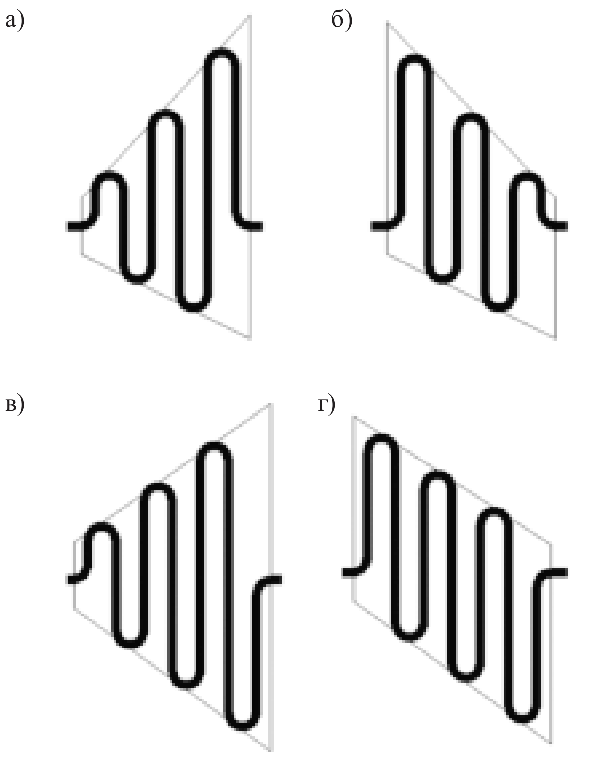

Рис. 16. Направленные вверх змейки с различными параметрами в верхнем треугольнике

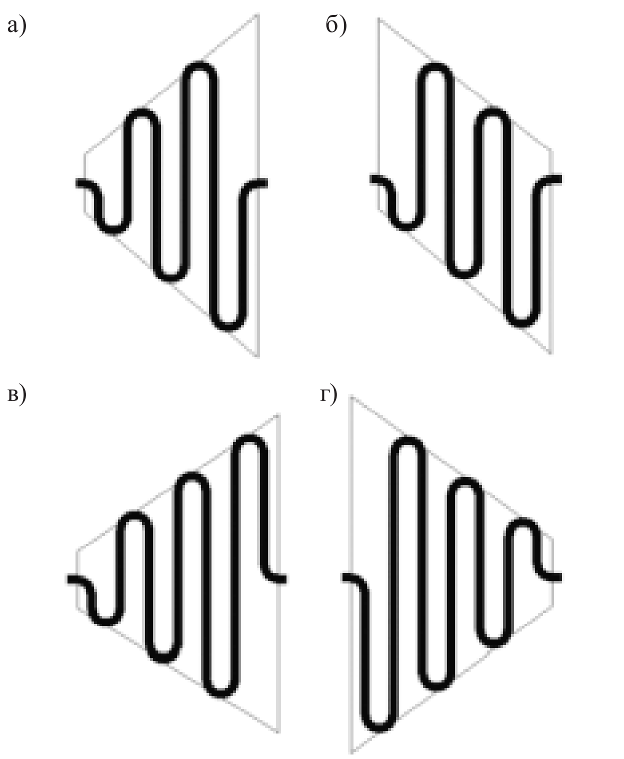

Рис. 17. Направленные вниз змейки с различными параметрами в верхнем треугольнике

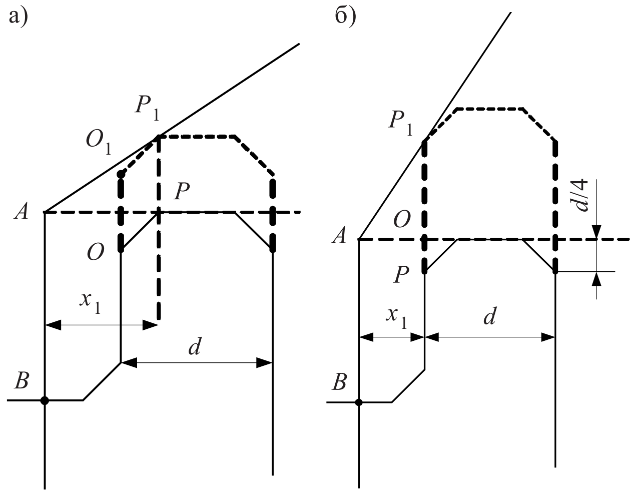

Рис. 18. Добавка длины от первого изгиба с аппроксимацией для случаев, когда угол возвышения меньше 45° (*а*) и больше 45° (*б*)

В случае с аппроксимацией необходимо учитывать два варианта взаимного расположения «шапочки» изгиба и гипотенузы треугольника — варианты отличаются точкой, в которой гипотенуза касается «шапочки».

На **рис. 18**, *а* абсцисса точки касания в треугольнике совпадает с абсциссой точки касания в прямоугольнике, т. е. угол наклона гипотенузы α — угол возвышения — меньше 45°).

Добавку длины в таком случае можно найти как удвоенную длину отрезка OO_1: $dL_1 = 2x_1\frac{h}{w}$. Тогда полная добавка длины вычисляется следующим образом:

$$dL = \sum_{i=1}^{k} dL_i = \sum_{i=1}^{k}\left(2x_i\frac{h}{w}\right) = \frac{2h}{w}\sum_{i=1}^{k} x_i;$$

$$dL = \frac{2h}{w}k(x_1 + d(k-1)) = \frac{k}{n}2h\left(\frac{x_1}{d} + (k-1)\right), \qquad (10)$$

где x_i — расстояние от вершины треугольника до точки касания i-го изгиба.

Для варианта на рис. 18, *б*, когда точки касания в треугольнике и прямоугольнике разные (α≥45°), добавка длины вычисляется как удвоенная сумма отрезков P_1O и OP: $dL_1 = 2x_1\frac{h}{w} + \frac{d}{2}$.

Тогда

$$dL = \sum_{i=1}^{k} dL_i = \sum_{i=1}^{k}\left(2x_i\frac{h}{w} + \frac{d}{2}\right) = \frac{2h}{w}\sum_{i=1}^{k} x_i + k\frac{d}{2};$$

$$dL = \frac{2h}{w}k(x_1 + d(k-1)) + k\frac{d}{2} =$$

$$= \frac{k}{n}\left(2h\left(\frac{x_1}{d} + (k-1)\right) + \frac{w}{2}\right). \qquad (11)$$

Формула (11) отличается от (10) только слагаемым $w/2$, что позволяет получить обобщающую формулу для этих двух вариантов.

Составим таблицу, аналогичную табл. 1, но для случая с аппроксимацией.

Данные, представленные в **табл. 2**, позволяют привести формулы (10) и (11) к общему виду, удобному для вычислений. Добавка длины в треугольнике будет нулевой в том случае, если число полупериодов не больше двух, а змейка направлена вниз.

Таблица 2

Соотношения параметров змейки в верхнем треугольнике для случая с аппроксимацией

bUp	*n*	*bDirNO*	α≥45	*k*	x_1/d	$(x_1/d+(k-1))\cdot 2$	Иллюстрация
да	четно	да (/)	да	*n*/2	1/2	*n*–1	**рис. 19**, *а*
да	четно	да (/)	нет	*n*/2	3/4	*n*–0,5	рис. 19, *б*
да	четно	нет (\)	да	*n*/2	1/2	*n*–1	рис. 19, *в*
да	четно	нет (\)	нет	*n*/2	3/4	*n*–0,5	рис. 19, *г*
да	нечетно	да (/)	да	(*n*–1)/2	1/2	*n*–2	**рис. 20**, *а*
да	нечетно	да (/)	нет	(*n*–1)/2	3/4	*n*–1,5	рис. 20, *б*
да	нечетно	нет (\)	да	(*n*–1)/2	3/2	*n*	рис. 20, *в*
да	нечетно	нет (\)	нет	(*n*–1)/2	7/4	*n*+0,5	рис. 20, *г*
нет	четно	да (/)	да	(*n*–2)/2	3/2	*n*–1	**рис. 21**, *а*
нет	четно	да (/)	нет	(*n*–2)/2	7/4	*n*–0.5	рис. 21, *б*
нет	четно	нет (\)	да	(*n*–2)/2	3/2	*n*–1	рис. 21, *в*
нет	четно	нет (\)	нет	(*n*–2)/2	7/4	*n*–0,5	рис. 21, *г*
нет	нечетно	да (/)	да	(*n*–1)/2	3/2	*n*	**рис. 22**, *а*
нет	нечетно	да (/)	нет	(*n*–1)/2	7/4	*n*+0,5	рис. 22, *б*
нет	нечетно	нет (\)	да	(*n*–1)/2	1/2	*n*–2	рис. 22, *в*
нет	нечетно	нет (\)	нет	(*n*–1)/2	3/4	*n*–1,5	рис. 22, *г*

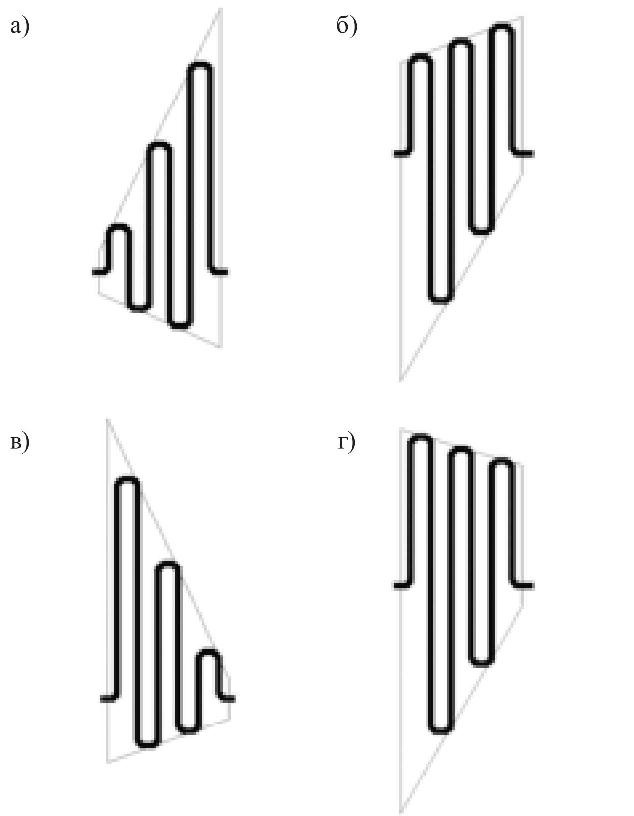

Рис. 19. Варианты направленных вверх змеек с четным числом полупериодов

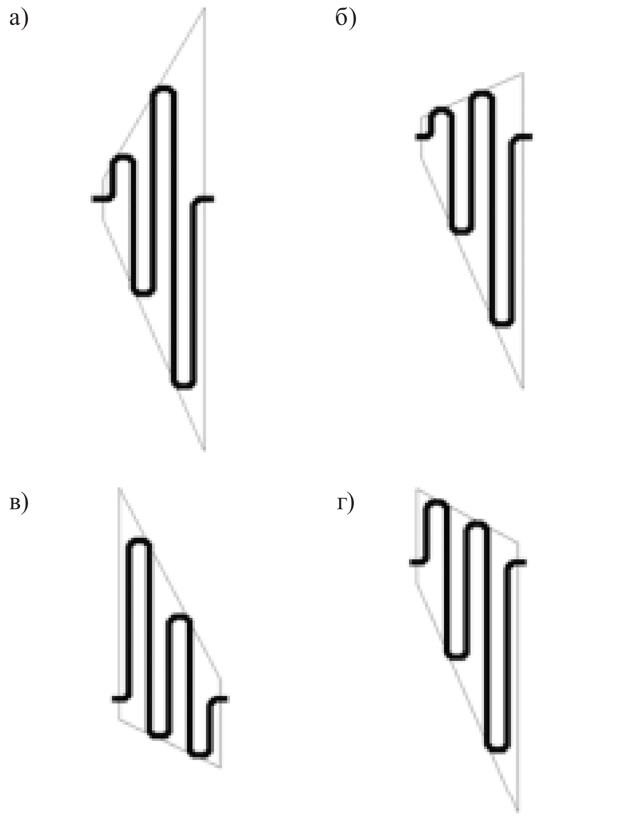

Рис. 20. Варианты направленных вверх змеек с нечетным числом полупериодов

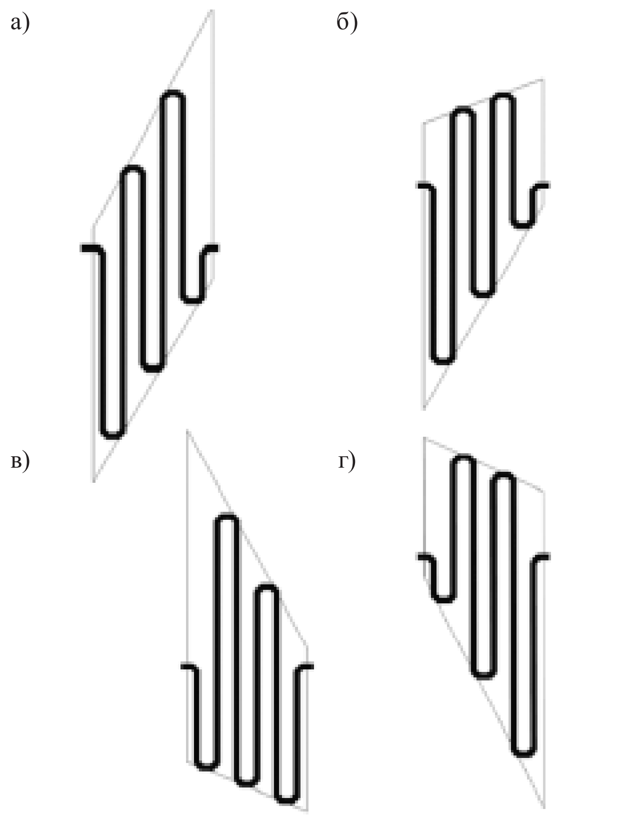

Рис. 21. Варианты направленных вниз змеек с четным числом полупериодов

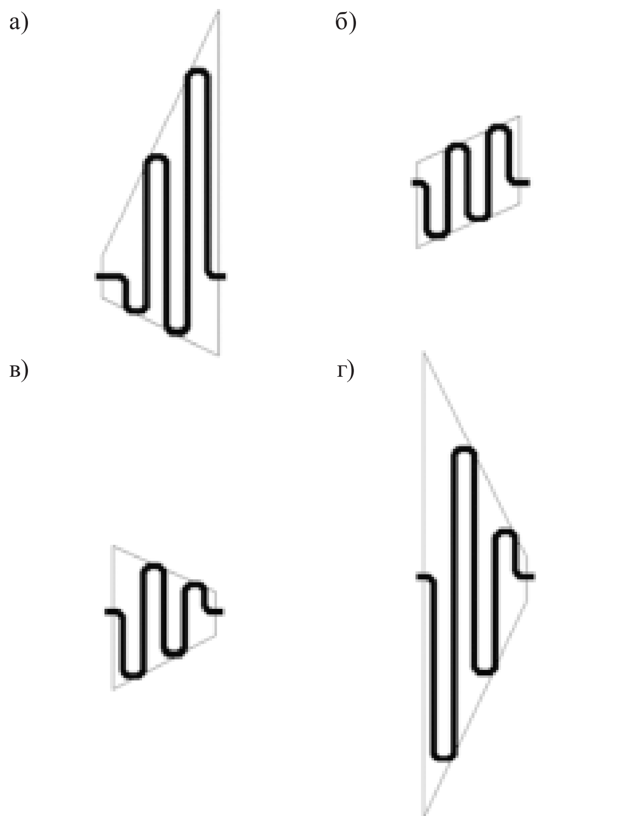

Рис. 22. Варианты направленных вниз змеек с нечетным числом полупериодов

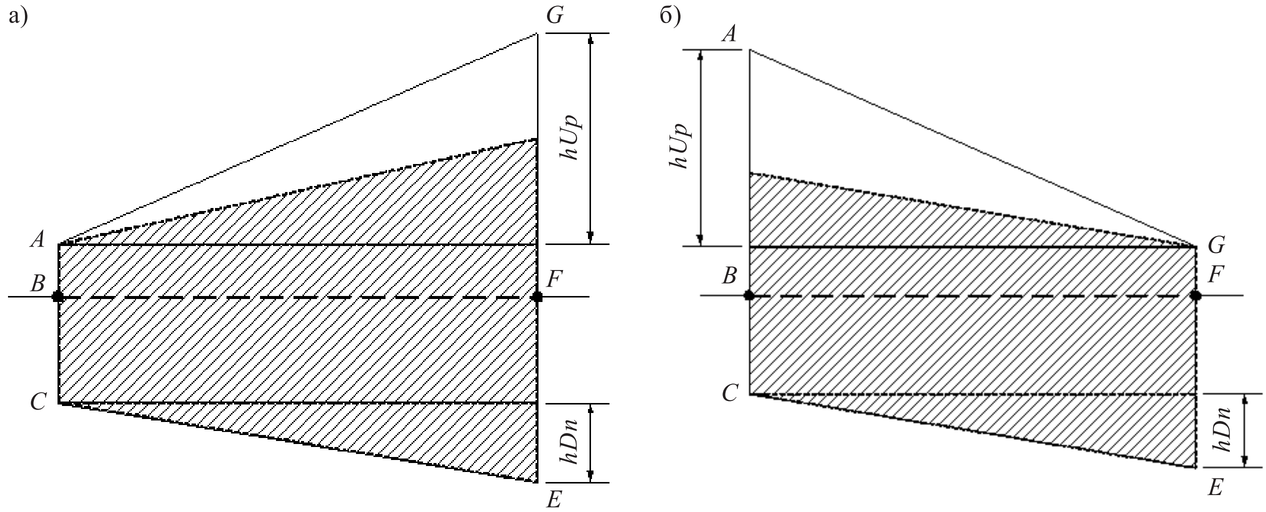

Рис. 23. Равнобедренная трапеция (*а*) и параллелограмм (*б*), в которых рассчитывается длина змейки

На основе приведенных выше данных получим обобщающую формулу для расчета максимальной добавки длины змейки в треугольнике для случая с аппроксимацией:

$$\left.\begin{aligned}
&kDivN=\begin{cases}\dfrac{n-1}{2n}, \text{ если } n \text{ нечетно,}\\ 0,5, \text{ если } n \text{ четно и установлен}\\ \qquad \text{флаг } bUp,\\ \dfrac{n-2}{2n}, \text{ если } n \text{ четно и не установлен}\\ \qquad \text{флаг } bUp;\end{cases}\\
&xd=\begin{cases} n-1, \text{ если } n \text{ четно,}\\ n-2, \text{ если } n \text{ нечетно и } bUp{=}bDirNO,\\ n, \text{ если } n \text{ нечетно и } bUp\neq bDirNO;\end{cases}\\
&xd=\begin{cases} xd+0,5, \text{ если } h<w,\\ xd, \text{ если } h\geq w;\end{cases}\\
&lAdd=\begin{cases}\dfrac{w}{2}, \text{ если } h\geq w,\\ 0, \text{ если } h<w;\end{cases}\\
&dL=kDivN\cdot\left(xd\cdot h+lAdd\right).
\end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Здесь соотношение величин h и w характеризует угол возвышения: $\alpha\geq45°$, когда $h\geq w$.

Расчет добавки длины змейки в нижнем треугольнике аналогичен расчету добавки длины в верхнем треугольнике, но со следующими поправками (см. рис. 6):

— если в верхнем треугольнике змейка направлена вверх, то в нижнем она направлена вниз, и наоборот;

— высота треугольника h — это модуль разности lBC и lFE;

— признак направления гипотенузы треугольника $bDirNO$ принимает значение «истина» в том случае, когда прямой угол треугольника находится справа, (т. е. когда lFE больше lBC).

Длина змейки в равнобедренной трапеции или в параллелограмме

Расчет длины змейки в равнобедренной трапеции и в параллелограмме, приведенных на **рис. 23**, производится одинаково, аналогично расчету в неравнобедренной трапеции: вычисляется длина змейки в прямоугольнике и суммируется с добавками длины в верхнем и нижнем треугольниках. Эти добавки вычисляются отдельно, по правилам, описанным выше. При этом, если $hUp\geq hDn$, высота верхнего треугольника будет равна hDn, если же $hUp<hDn$, то высота нижнего треугольника будет равна hUp.

Длина змейки в симметричном прямоугольнике

Высота симметричного прямоугольника (**рис. 24**) рассчитывается согласно формуле

$$h=\min\left(\min\left(lBA, lFG\right), \min\left(lBC, lFE\right)\right), \qquad (13)$$

где lBA, lFG, lBC, lFE — величины, указанные на рис. 6.

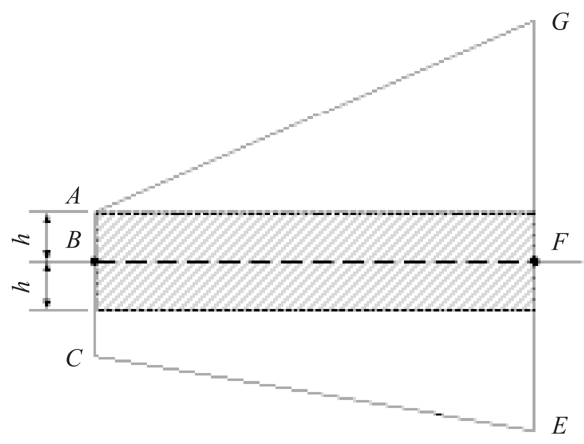

Рис. 24. Симметричный прямоугольник, в котором рассчитывается длина змейки

Из формулы (4), приняв hUp и hDn равными h, получим

$$len = 2h(n-1) + (lenHat - d)n. \quad (14)$$

Таким образом, длина змейки в симметричном прямоугольнике — это сумма значений длины, рассчитанной по формуле (14), и избытка высоты трапеции.

Первая критическая длина змейки

Первая критическая змейка (**рис. 25**) — это змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, параметр h (см. рис. 24) для которого равен длине полупериода d. Длину такой змейки будем называть первой критической длиной змейки ($lenCrit1$). Критические змейки всегда аппроксимированы, поэтому расчет длины будет проводиться только для случая с аппроксимацией.

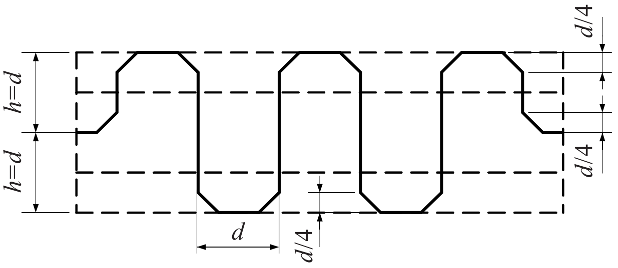

Рис. 25. Первая критическая змейка

Для расчета первой критической длины справедлива формула (14) при $h=d$:

$$len = (lenHat - d)n + 2d(n-1). \quad (15)$$

Подставив сюда выражение (3) и проведя преобразования, получим

$$len = n \cdot d\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) + d(n-2). \quad (16)$$

Учитывая, что произведение $n{\cdot}d$ (количества полупериодов и длины полупериода) — это высота трапеции, запишем искомую величину на основе формулы (16) в следующем виде:

$$lenCrit1 = lBF\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) + d(n-2) + lExt. \quad (17)$$

В связи с необходимостью обрабатывать и закритические змейки, длина которых меньше первой критической, но больше второй, найдем формулу расчета длины змейки для случая, когда величина h лежит в диапазоне (d/2; d].

Длина закритической змейки складывается из длины горизонтальных и наклонных участков «шапочек» и вертикальных участков змейки (крайние участки рассматриваются отдельно). С учетом избытка высоты трапеции получим формулу для расчета длины первой закритической змейки

$$len = lBF\frac{\sqrt{2}}{2} + 2h(n-1) + lExt. \quad (18)$$

Вторая критическая длина змейки

Вторая критическая змейка — это змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, для которого $h=d/2$ (**рис. 26**).

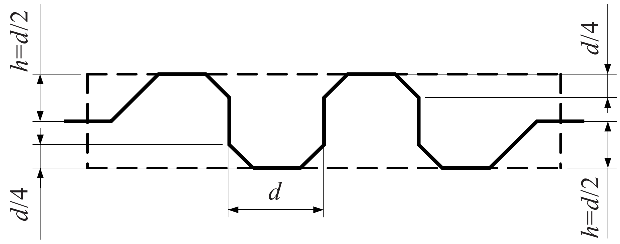

Рис. 26. Вторая критическая змейка

Вторая закритическая змейка — это змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, параметр h для которого лежит в диапазоне (d/4; d/2]. В отличие от предыдущего случая, здесь формула расчета длины в симметричном прямоугольнике уже не применима. Общая формула расчета длины для второй закритической змейки имеет следующий вид:

$$len = \sqrt{2}\left(\frac{lBF}{2} - d\right) + 2h(n-2) + 2\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} + {}$$
$$+ d + lExt. \quad (19)$$

Формулу для расчета второй критической длины змейки получим отсюда после подстановки $h=d/2$:

$$lenCrit2 = lBF\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) - d + lExt. \quad (20)$$

Третья критическая длина змейки

Третья критическая змейка — это змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, для которого $h=d/4$ (**рис. 27**). Длину такой змейки будем называть третьей критической длиной змейки.

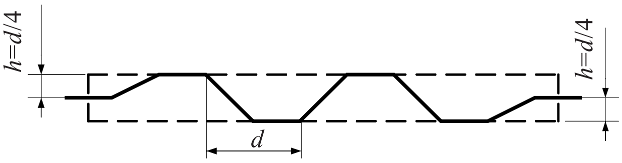

Рис. 27. Третья критическая змейка

Третья закритическая змейка — это змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, параметр h для которого лежит в диапазоне (0; d/4]. Как и в предыдущем случае, формула расчета длины в симметричном прямоугольнике неприменима. Общая формула расчета длины для третьей закритической змейки имеет следующий вид:

$$len = \frac{lBF}{2} + (n-2)\sqrt{4h^2 + \frac{d^2}{4}} + 2\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} + lExt. \quad (21)$$

Формулу для расчета третьей критической длины змейки получим, подставив в формулу (21) $h=d/4$:

$$lenCrit3 = lBF\left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) + d\left(\frac{\sqrt{5}}{2} - \sqrt{2}\right) + lExt. \quad (22)$$

РАСЧЕТ ФОРМЫ ЗМЕЙКИ ПО ЗАДАННОЙ ДЛИНЕ

Цель использования змеек — создание проводников заданной длины. Требуемая длина определяет форму змейки, которая будет создана на отведенной площади, ограниченной трапецией. Если площадь исходной трапеции избыточна, то змейка вписывается в трапецию меньшей площади, размеры которой нужно определить. Рассчитать форму змейки по заданной длине проводника можно после того, как вычислены все параметры трапеции и змейки, описанные выше.

На **рис. 28** приведена схема алгоритма расчета формы змейки в трапеции по заданной длине. В приведенной схеме применены следующие обозначения:

len — требуемая длина проводника;
lenMin — минимально возможная длина змейки в трапеции;
lenMax — максимально возможная длина змейки в трапеции;
lenRect — длина змейки в прямоугольнике;
lenPar — длина змейки в равнобедренной трапеции или параллелограмме;
lenSymRect — длина змейки в симметричном прямоугольнике;
*lenCrit*1 — первая критическая длина змейки;
*lenCrit*2 — вторая критическая длина змейки;
*lenCrit*3 — третья критическая длина змейки.

Перечисленные величины соотносятся следующим образом:

$$0 < lenMin < lenCrit3 < lenCrit2 < lenCrit1 \le$$
$$\le lenSymRect \le lenRect \le lenPar \le lenMax. \qquad (23)$$

Прежде чем перейти к описанию собственно формирования и вывода змеек после расчета формы, следует подробно рассмотреть процедуры, входящие в алгоритм:

— уменьшение большего треугольника до требуемого размера;
— уменьшение обоих треугольников до требуемого размера;
— уменьшение большего прямоугольника до требуемого размера;
— уменьшение обоих прямоугольников до требуемого размера;
— вычисление параметров первой, второй и третьей закритических змеек.

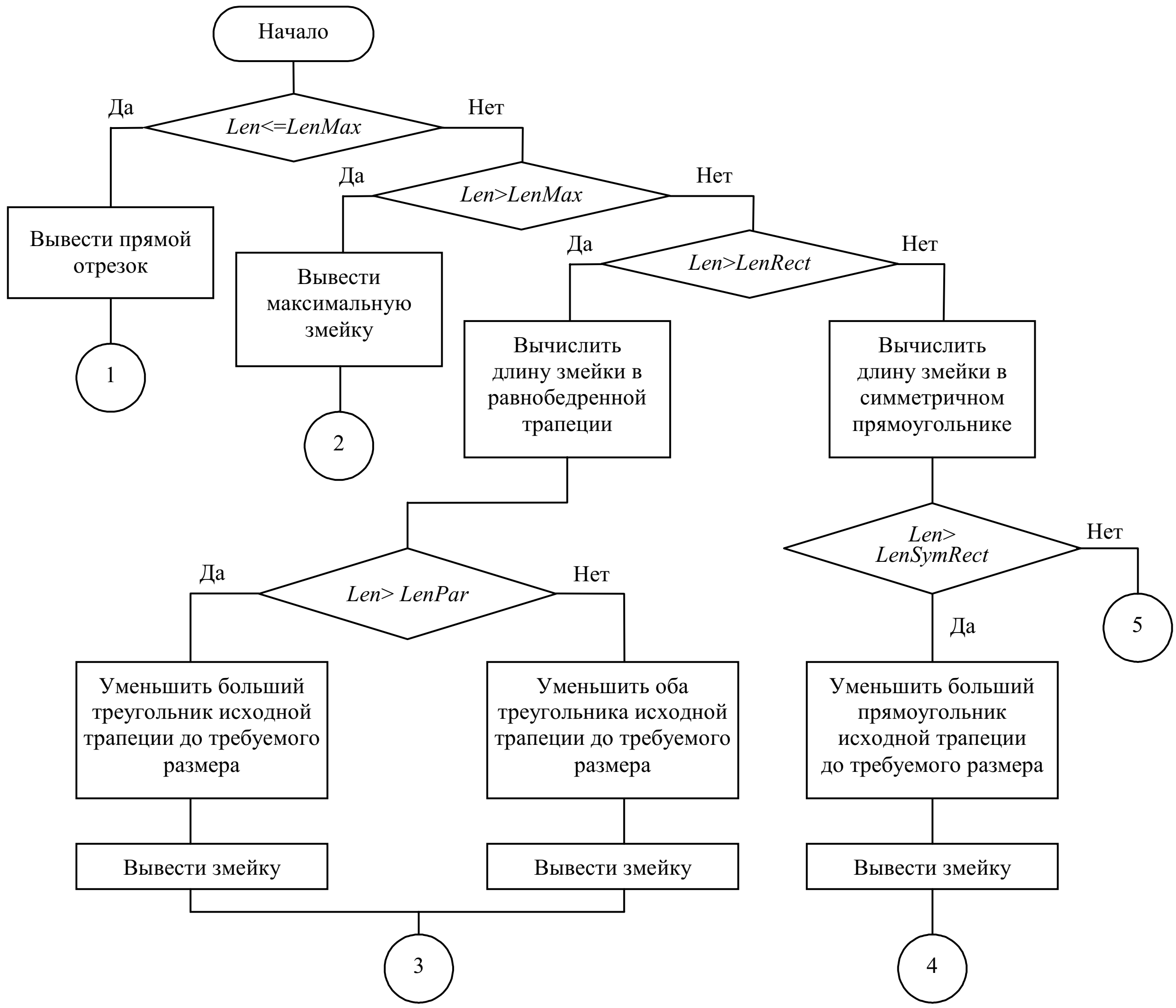

Рис. 28, *а*. Начало алгоритма расчета формы змейки по заданной длине

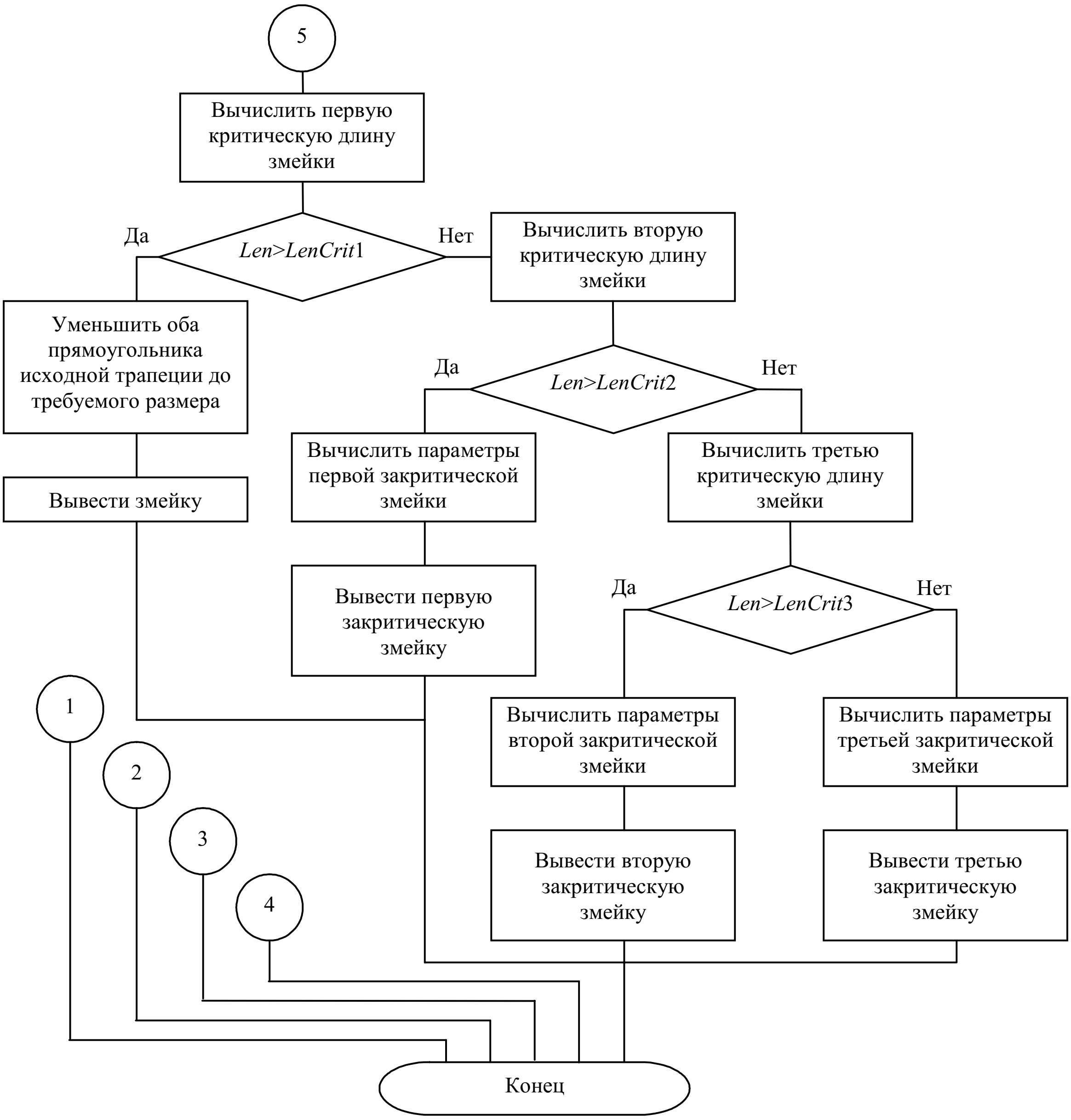

Рис. 28, *б*. Окончание алгоритма расчета формы змейки по заданной длине

Уменьшение большего треугольника до требуемого размера

Когда требуемая длина змейки больше, чем длина змейки в равнобедренной трапеции или параллелограмме (см. рис. 23), но меньше, чем длина змейки в исходной трапеции, необходимо найти, при какой высоте большего из треугольников будет обеспечена необходимая длина змейки.

Прежде всего, нужно определить, какой из треугольников является бóльшим. При этом необходимо учесть ситуацию, когда в одном из треугольников не может быть ни одного изгиба змейки — высоту такого треугольника будем считать нулевой. Это наблюдается при числе полупериодов n=2. Ни одного изгиба в верхнем треугольнике не будет, когда змейка направлена вниз, а в нижнем — когда вверх.

Исходя из вышесказанного, получим формулы для расчета высоты верхнего (hUp) и нижнего (hDn) треугольников

$$\left.\begin{array}{l} hUp = \begin{cases} 0, \text{если } n = 2 \text{ и флаг } bUp \text{ не установлен,} \\ \left| lBA - lFG \right|, \text{в остальных случаях;} \end{cases} \\ hDn = \begin{cases} 0, \text{если } n = 2 \text{ и флаг } bUp \text{ установлен,} \\ \left| lBC - lFE \right|, \text{в остальных случаях.} \end{cases} \end{array}\right\} \quad (24)$$

Сравнение полученных отсюда величин позволяет определить больший из двух треугольников. Для этого треугольника требуемая добавка длины dL вычисляется как разность между требуемой длиной змейки и длиной змейки в прямоугольнике с добавкой длины в меньшем треугольнике. Исходя из требуемой добавки длины змейки, найдем подходящую высоту большего треугольника.

Для случая без аппроксимации обратимся к формуле (9). Необходимо решить относительно h следующее уравнение:

$$dL = kDivN \cdot \left(xd \cdot h - \sqrt{w^2 + h^2} + w \right),$$

где $kDivN$ и xd рассчитываются по формуле (9).

Пусть $f=dL/kDivN-w$. Тогда искомая высота треугольника для случая без аппроксимации вычисляется по формуле

$$h = \frac{xd \cdot f + \sqrt{D}}{xd^2 - 1}, \qquad (25)$$

где $D = (xd \cdot f)^2 - (xd^2 - 1)(f^2 - w^2)$.

Для случая с аппроксимацией обратимся к формуле (12). Необходимо решить относительно h следующее уравнение:

$$dL = kDivN \cdot \left(xd \cdot h + lAdd \right),$$

где $kDivN$, xd и $lAdd$ рассчитываются по формуле (12).

Пусть $f=dL/kDivN-lAdd$. Тогда $xd \cdot h=f$, а искомая высота треугольника для случая с аппроксимацией вычисляется по формуле

$$h=f/xd. \qquad (26)$$

После того, как высота треугольника найдена, корректируется соответствующая точка трапеции (A, C, E или G) и соответствующая ей величина (lBA, lBC, lFE или lFG).

Уменьшение треугольников до требуемого размера

Когда требуемая длина змейки не больше, чем длина змейки в равнобедренной трапеции или параллелограмме (см. рис. 23), но больше, чем длина змейки в прямоугольнике, необходимо рассчитать высоту обоих треугольников, при которой будет обеспечена требуемая длина змейки.

Требуемая добавка длины змейки dL в треугольниках вычисляется как разность требуемой длины и длины змейки в прямоугольнике. Используя dL как исходный параметр, найдем подходящую высоту h.

Для случая без аппроксимации обратимся к формуле (9). Необходимо решить относительно h следующее уравнение:

$$\begin{aligned} dL &= kDivN1 \cdot \left(xd1 \cdot h - \sqrt{w^2 + h^2} + w \right) + \\ &+ kDivN2 \cdot \left(xd2 \cdot h - \sqrt{w^2 + h^2} + w \right) = \\ &= h\left(kDivN1 \cdot xd1 + kDivN2 \cdot xd2 \right) - \\ &- \sqrt{w^2 + h^2}\left(kDivN1 + kDivN2 \right) + \\ &+ w\left(kDivN1 + kDivN2 \right), \end{aligned}$$

где $kDivN1$, $xd1$, $kDivN2$, $xd2$ рассчитываются по формуле (9) для верхнего и нижнего треугольников.

Применим следующие обозначения:

$a=kDivN1+kDivN2$, $b=kDivN1 \cdot xd1+kDivN2 \cdot xd1$,

$c=a \cdot w-dL$;

$a1=a^2-b^2$, $b1=bc$, $c1=a^2w^2-c^2$.

Искомая высота для случая без аппроксимации вычисляется по формуле

$$h = \frac{b1 - \sqrt{D}}{a1}, \qquad (27)$$

где $D = b1^2 - a1 \cdot c1$.

Для случая с аппроксимацией обратимся к формуле (12). Необходимо решить относительно h следующее уравнение:

$$\begin{aligned} dL &= kDivN1 \cdot \left(xd1 \cdot h + lAdd \right) + \\ &+ kDivN2 \cdot \left(xd2 \cdot h + lAdd \right) = \\ &= h\left(kDivN1 \cdot xd1 + kDivN2 \cdot xd2 \right) + \\ &+ lAdd\left(kDivN1 + kDivN2 \right). \end{aligned}$$

Пусть

$$a = kDivN1 \cdot xd1 + kDivN2 \cdot xd2,$$

$$b = dL - lAdd\left(kDivN1 + kDivN2 \right).$$

Искомая высота для случая с аппроксимацией вычисляется по формуле

$$h=b/a. \qquad (28)$$

После того, как высота треугольников найдена, корректируются соответствующие две точки трапеции и соответствующие им величины (lBA, lBC, lFE или lFG).

Уменьшение большего прямоугольника до требуемого размера

Когда требуемая длина змейки не больше, чем длина змейки в прямоугольнике исходной трапеции (см. рис. 10), но больше, чем длина змейки в симметричном прямоугольнике (см. рис. 24), необходимо найти, при какой высоте большей части прямоугольника (большего прямоугольника) будет обеспечена необходимая длина змейки. В этом случае длина змейки формируется из длины змейки в симметричном прямоугольнике и добавки длины в несимметричной части прямоугольника, высоту которой необходимо найти.

Требуемая добавка длины может быть рассчитана как разность между требуемой длиной и длиной змейки в симметричном прямоугольнике. Из полученной величины найдем искомую высоту.

Если бо́льшим является нижний прямоугольник, то флаг направленности змейки инвертируется, иначе — нет.

Добавка длины в большем прямоугольнике может быть вычислена как сумма прямолинейных участков, выделенных на **рис. 29**, длина каждого из которых равна $h=hUp-hDn$ (именно величина h и является искомой добавкой высоты симметричного прямоугольника). Количество этих прямолинейных участков можно вычислить по следующей формуле:

$$k = \begin{cases} n-1, \text{ если } n \text{ нечетно;} \\ n, \text{ если } n \text{ четно и установлен флаг } bUp; \\ n-2, \text{ если } n \text{ четно и не установлен флаг } bUp. \end{cases}$$

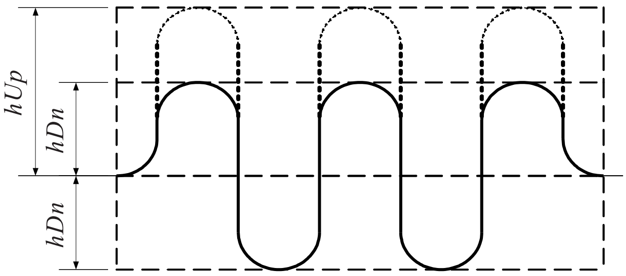

Рис. 29. Добавка длины в большем прямоугольнике

Таким образом, добавка длины змейки в большем прямоугольнике равна

$dL=k \cdot h$,

откуда получаем формулу для вычисления добавки высоты большего прямоугольника

$$h=dL/k. \tag{29}$$

После того, как добавка высоты найдена, трапеция преобразуется к прямоугольному виду (корректируются точки A и G или C и E), как это показано, например, на **рис. 30**.

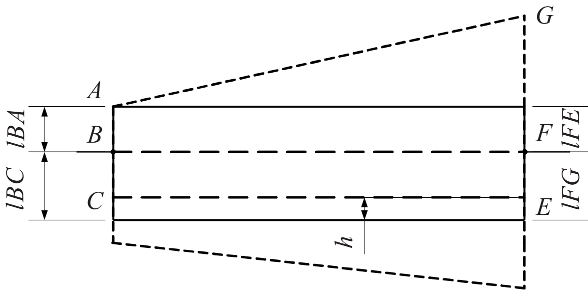

Рис. 30

Уменьшение прямоугольников до требуемого размера

Когда требуемая длина змейки *len* не больше, чем длина змейки в симметричном прямоугольнике, но больше, чем первая критическая длина змейки, необходимо рассчитать высоту симметричного прямоугольника, при которой будет обеспечена требуемая длина змейки.

Искомая величина h — высота каждой из равных частей симметричного прямоугольника (см. рис. 24). Требуется решить относительно h следующее уравнение, полученное из формулы (14):

$$len=\left(lenHat-d\right)n+2h\left(n-1\right)+lExt,$$

где *lenHat* — длина «шапочки», рассчитываемая по формулам (2) или (3), в зависимости от флага аппроксимации.

Решение этого уравнения дает формулу, позволяющую вычислить требуемую высоту симметричного прямоугольника:

$$h=\frac{\left(len-lExt\right)-\left(lenHat-d\right)n}{2\left(n-1\right)}. \tag{30}$$

Когда высота найдена, трапеция преобразуется к прямоугольному виду (корректируются точки A, C,

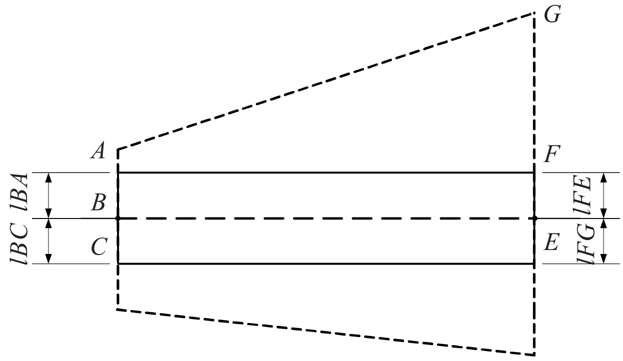

Рис. 31

E и G), как это показано на **рис. 31** — здесь $lBA=lBC=lFE=lFG=h$.

Параметры первой закритической змейки

Первая закритическая змейка (см. рис. 25) может быть рассмотрена как аппроксимированная (и только) змейка, вписанная в симметричный прямоугольник, т. к. их структуры идентичны.

Основным и единственным параметром первой закритической змейки является высота симметричного прямоугольника, в который эта змейка вписывается. Она вычисляется по формуле (30), а трапеция преобразуется к прямоугольному виду, представленному на рис. 31.

С уменьшением требуемой длины змейки длина прямолинейных участков первой закритической змейки уменьшается до тех пор, пока длина крайних участков не станет нулевой — тогда змейка переходит во вторую закритическую.

Параметры второй закритической змейки

Вторая закритическая змейка (см. рис. 26) так же, как и первая, вписывается в симметричный прямоугольник, но ее уже нельзя рассматривать просто как аппроксимированную змейку, вписанную в симметричный прямоугольник. Структура второй закритической змейки отличается от структуры обычной змейки — у нее отсутствуют крайние вертикальные участки, вместо них имеются наклонные участки. За счет уменьшения угла их наклона и длины вертикальных участков в средней части змейки возможно уменьшение общей длины второй закритической змейки. Когда длина вертикальных участков становится равной нулю, змейка переходит в третью закритическую.

Для того чтобы найти высоту симметричного прямоугольника в этом случае, нужно решить относительно h уравнение (19).

Применим следующие обозначения:

$$a=n-2,\ b=d^2/4,\ c=\frac{len-lExt-\sqrt{2}\left(\frac{lBF}{2}-d\right)-d}{2};$$

$a1=a^2-1$, $b1=ac$, $c1=c^2-b$.

С учетом этого, уравнение (19) сведем к квадратному

$a1 \cdot h^2-2 \cdot b1 \cdot h+c1=0.$

При решении уравнения следует учесть, что коэффициенты $a1$ и $b1$ могут быть нулевыми. Рассмотрим эти случаи отдельно.

Коэффициент $a1$ принимает нулевое значение, когда число полупериодов n равно трем. В этом случае

$$h = \frac{c1}{2 \cdot b1}. \qquad (31)$$

Коэффициент $b1$ принимает нулевое значение, когда n=2. В этом случае

$$h = \sqrt{c1}. \qquad (32)$$

В остальных случаях искомая высота вычисляется по формуле

$$h = \frac{b1 - \sqrt{D}}{a1}, \qquad (33)$$

где $D = b1^2 - a1 \cdot c1.$

Далее, трапеция преобразуется к прямоугольному виду, представленному на рис. 31.

Параметры третьей закритической змейки

Третья закритическая змейка (см. рис. 27) вписывается в симметричный прямоугольник, и ее так же, как вторую закритическую, нельзя рассматривать просто как аппроксимированную змейку, вписанную в симметричный прямоугольник. В ее структуре все вертикальные участки отсутствуют, вместо них имеются наклонные, причем угол наклона крайних участков меньше, чем внутренних. За счет уменьшения угла наклона крайних и внутренних участков возможно уменьшение общей длины третьей закритической змейки. Когда углы наклона становятся нулевыми, змейка превращается в отрезок.

Для того чтобы найти высоту симметричного прямоугольника в этом случае, нужно решить относительно h уравнение (21).

Введем следующие обозначения: $x=h^2$;

$$a = n - 2,\ b = \frac{d^2}{4},\ c = len - lExt - \frac{lBF}{2};$$

$$a1 = \frac{a^2+1}{a},\ c1 = \frac{(c^2 - a^2 b)/4 - b}{a},\ a \neq 0;$$

$$a2 = a1^2 - 4,\ b2 = \frac{5b}{2} + a1 \cdot c1,\ c2 = c1^2 - b^2.$$

При n=2 искомая высота вычисляется по формуле

$$h = \sqrt{\frac{c^2}{4} - b}. \qquad (34)$$

Коэффициент $a2$ принимает нулевое значение, когда n=3. Тогда получаем $2 \cdot b2 \cdot x = c2$. В этом случае

$$h = \sqrt{\frac{c2}{2 \cdot b2}}. \qquad (35)$$

В остальных случаях

$$x = \frac{b2 - \sqrt{D}}{a2},$$

где $D = b2^2 - a2 \cdot c2.$

В полученном решении есть недостаток — оно может привести к потере точности за счет вычитания больших близких величин $b2$ и $\sqrt{D}$ [5]. Его можно устранить, умножив числитель и знаменатель на величину $b2 + \sqrt{D}$, что в результате дает

$$x = \frac{c2}{b2 + \sqrt{D}}.$$

Тогда искомая высота вычисляется по формуле

$$h = \sqrt{\frac{c2}{b2 + \sqrt{b2^2 - a2 \cdot c2}}}. \qquad (36)$$

Далее, как и в случаях с первой и второй закритическими змейками, трапеция преобразуется к прямоугольному виду, представленному на рис. 31.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗМЕЕК И ТОЧНАЯ ПОДГОНКА ДЛИНЫ

После расчета формы получаем змейку одного из следующих видов:

— змейка в трапеции;
— змейка в равнобедренной трапеции или в параллелограмме;
— змейка в прямоугольнике;
— змейка в симметричном прямоугольнике;
— первая закритическая змейка;
— вторая закритическая змейка;
— третья закритическая змейка;
— отрезок прямой.

Формирование и вывод последнего из перечисленных видов змеек — отрезка прямой — не представляет сложностей, т. к. все, что требуется — это создать отрезок, соединяющий точки B_0 и F_0 исходной трапеции. Фактическая длина змейки в этом случае равна минимально возможной длине в заданной трапеции.

Для формирования и вывода змеек в любой трапеции и в любом прямоугольнике можно использовать схожие процедуры, учитывающие параметры трапеции, рассчитанные выше. При этом змейки с аппроксимацией и без нее обрабатываются по-разному.

Первая закритическая змейка может быть обработана той же процедурой, что и перечисленные выше виды аппроксимированных змеек.

Формирование и вывод второй и третьей закритических змеек осуществляется отдельной процедурой, учитывающей особенности этих форм змеек.

Змейка в трапеции без аппроксимации

Как было сказано выше, для формирования змеек без аппроксимации в трапециях и в прямоугольниках используется одна и та же процедура, поэтому рассмотрим только пример с трапецией.

На **рис. 32** приведена схема построения змейки с характерными точками.

Формирование змейки происходит следующим образом. Сначала рассчитываются координаты точек, позволяющих создать тот или иной участок змейки (в данном случае это отрезок прямой либо дуга), после чего этот участок формируется, и вычисляется его

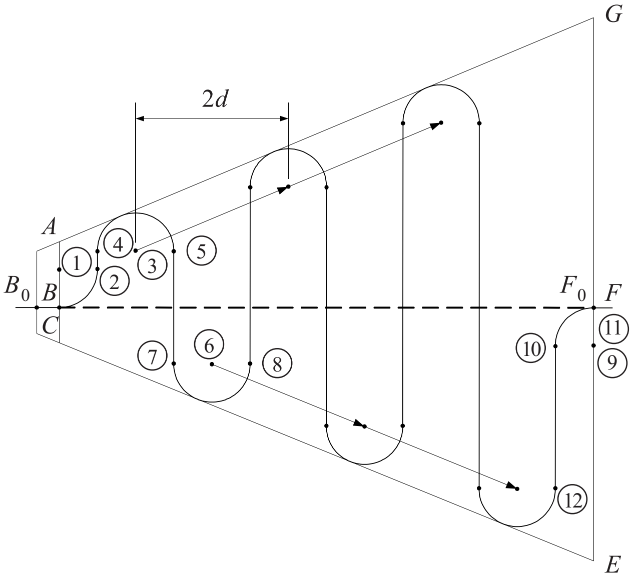

Рис. 32. Построение змейки в трапеции без аппроксимации

фактическая длина (во внутренних единицах измерения системы).

Помимо характерных точек формы змейки, учитывается еще и избыток высоты трапеции — если точки B и B_0 не совпадают, создается отрезок B_0B, а если не совпадают точки F и F_0 — создается отрезок FF_0. Первый из указанных отрезков создается в начале процедуры формирования, второй — в последнюю очередь.

После вычисления координат точек *1—8* координаты точек для формирования следующих участков змейки вычисляются по принципу параллельного переноса рассчитанных точек по направлению *AG* или *CE* (расстояние по оси *BF* равно 2*d*), как показано на рис. 32.

Последняя рассчитанная точка — это точка *12* (от точки B_0 до нее змейка полностью сформирована, фактическая длина змейки — сумма длин всех созданных участков — рассчитана). После вычисления координат точек *9*, *10* и *11* приступаем к заключительному этапу формирования змейки — к подгонке длины.

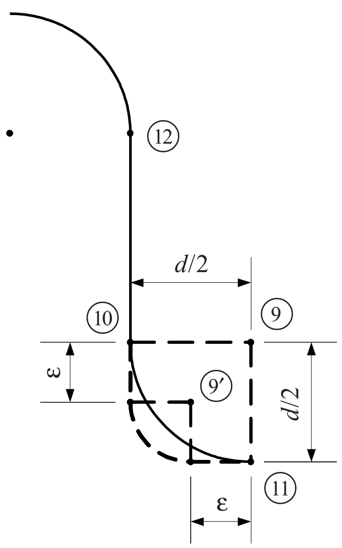

Рис. 33. Подгонка длины змейки без аппроксимации

Подгонка длины необходима в связи с тем, что в САПР «TopoR» используется внутренняя единица измерения, равная 100 нм, т. е. координаты точек округляются до величины, кратной 100 нм. В то же время, аналитический расчет длины змеек различной формы происходит с большей точностью. Следовательно, зная фактическую длину сформированных участков змейки и требуемую длину, заданную пользователем, необходимо «подогнать» длину сформированной змейки как можно ближе к требуемой. Добиться этого можно, перемещая точки *9*, *10* и *11*, как показано на **рис. 33**.

Расчет фактической длины змейки учитывает длину участков, которые будут созданы в процессе подгонки между точками *12*, *10* и *11*. Перемещение точек *9*, *10* и *11* позволяет уменьшить фактическую длину змейки. Ее увеличение возможно только тогда, когда точки F и F_0 не совпадают, т. е. имеется избыток высоты трапеции справа. Исходя из разницы требуемой и фактической длины (Δ), найдем величину ε, указанную на рис. 33.

Длина участков змейки между точками *12*, *10* и *11* вычисляется следующим образом:

$$len_{(10-12)} + \frac{2\pi\frac{d}{2}}{4} = len_{(10-12)} + \frac{\pi d}{4},$$

где $len_{(10-12)}$ — длина отрезка между точками *10* и *12*.

После перемещения точек на величину ε длина этих же участков будет равна

$$len_{(10-12)} + \varepsilon + \frac{2\pi\left(\frac{d}{2} - \varepsilon\right)}{4} + \varepsilon = len_{(10-12)} + 2\varepsilon + \frac{\pi d}{4} - \frac{\pi\varepsilon}{2}.$$

Зная длину участков до и после перемещения точек, найдем величину Δ как их разность и получим

$$\Delta = -2\varepsilon + \frac{\pi\varepsilon}{2} = \varepsilon\left(\frac{\pi}{2} - 2\right),$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\frac{\pi}{2} - 2}. \quad (37)$$

На абсолютное значение величины ε накладываются следующие ограничения:

— $|\varepsilon|$ не может превышать исходное расстояние между точками *10* и *12* (чтобы не была нарушена структура формы змейки);

— $|\varepsilon|$ не может превышать величину $d/2$ (чтобы не были нарушены заданные пользователем зазоры между проводниками внутри змейки);

— $|\varepsilon|$ не может превышать расстояние между точками F и F_0, если требуется увеличение фактической длины змейки.

Таким образом, перемещая указанные точки на расстояния, кратные 100 нм, суммарную фактическую длину змейки можно контролировать с точностью порядка 50 нм. Повторение процедуры подгонки длины ограниченное число раз позволяет рассчитать окончательные координаты точек *9*, *10* и *11* так, что требуемая длина змейки будет обеспечиваться с точностью не хуже 50 нм.

После того, как координаты точек *9*, *10* и *11* вычислены, создаются соответствующие участки змейки — один или два прямолинейных и дугообразный. В результате фактическая длина неаппроксимированной змейки, рассчитываемая как сумма длин созданных на последнем этапе участков змейки и длин сформированных ранее участков, отличается от требуемой длины не больше, чем на 50 нм.

Змейка в трапеции с аппроксимацией

Для формирования змеек с аппроксимацией в трапециях и в прямоугольниках, а также для формирования первой закритической змейки, используется одна и та же процедура. Рассмотрим ее на примере трапеции.

На **рис. 34** приведена схема построения змейки с характерными точками.

Формирование змейки происходит так же, как это описано в предыдущем разделе, за тем исключением, что здесь все участки являются отрезками прямых. Аналогично учитывается и избыток высоты трапеции.

Основной величиной, используемой для расчета характерных точек изгибов змейки, является *d*/4. После того, как рассчитаны координаты групп точек *3—6* и *7—10*, координаты точек для формирования следующих участков змейки вычисляются по принципу параллельного переноса рассчитанных точек по направлению *AG* или *CE* (расстояние по оси *BF* равно 2*d*), как показано на рис. 34.

После вычисления координат точек *11* и *12* можно приступать к подгонке длины. Для змеек с аппроксимацией это можно сделать, перемещая точку *11*, как показано на **рис. 35**. Такое перемещение позволяет не только уменьшать фактическую длину змейки, но и увеличивать ее. В зависимости от направления перемещения точки *11*, величина перемещения ε будет иметь знак «+» или «–», т. е. будет равна ε_1 или ε_2.

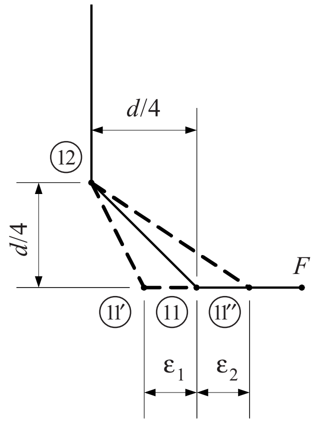

Рис. 35. Подгонка длины змейки с аппроксимацией

Фактическая длина змейки вычисляется как сумма длин уже созданных участков и участков, которые будут созданы между точками *12*, *11* и *F* при подгонке. Для подгонки длины необходимо найти величину ε, исходя из разницы требуемой и фактической длины (Δ).

Длина участков змейки между точками *12*, *11* и *F* вычисляется как

$$\sqrt{\frac{d^2}{16}+\frac{d^2}{16}}+\frac{d}{4}=\frac{d\sqrt{2}}{4}+\frac{d}{4}=\frac{d\left(\sqrt{2}+1\right)}{4}.$$

После перемещения точки на величину ε длина этих же участков будет равна

$$\sqrt{\frac{d^2}{16}+\left(\frac{d}{4}-\varepsilon\right)^2}+\frac{d}{4}+\varepsilon=\sqrt{\frac{d^2}{8}-\frac{d\cdot\varepsilon}{2}+\varepsilon^2}+\frac{d}{4}+\varepsilon.$$

Зная длину участков до и после перемещения точки, получим

$$\Delta=\frac{d\sqrt{2}}{4}-\sqrt{\frac{d^2}{8}-\frac{d\cdot\varepsilon}{2}+\varepsilon^2}-\varepsilon.$$

Для приближенного вычисления Δ приведем выражение под корнем к формуле квадрата разности, для чего величину ε^2 заменим на $\varepsilon^2/2$, и тогда получим

$$\Delta\approx-\frac{\varepsilon}{2+\sqrt{2}},$$

откуда

$$\varepsilon=-\Delta(2+\sqrt{2}). \qquad (38)$$

На абсолютное значение величины ε накладывается только одно ограничение — оно не может превышать величину *d*/4 (чтобы не были нарушены заданные пользователем зазоры между проводниками внутри змейки).

После того, как окончательные координаты точки *11* вычислены, создаются соответствующие участки змейки — отрезки между точками *12* и *11* и между точками *11* и *F*. В результате подгонки полученная фак-

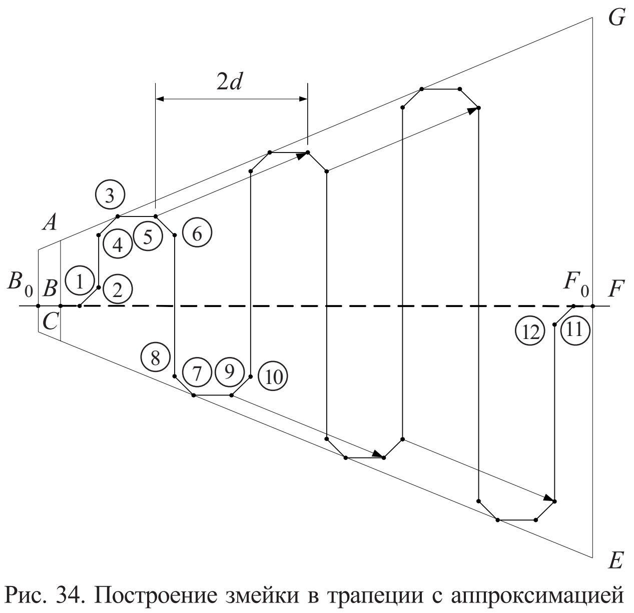

Рис. 34. Построение змейки в трапеции с аппроксимацией

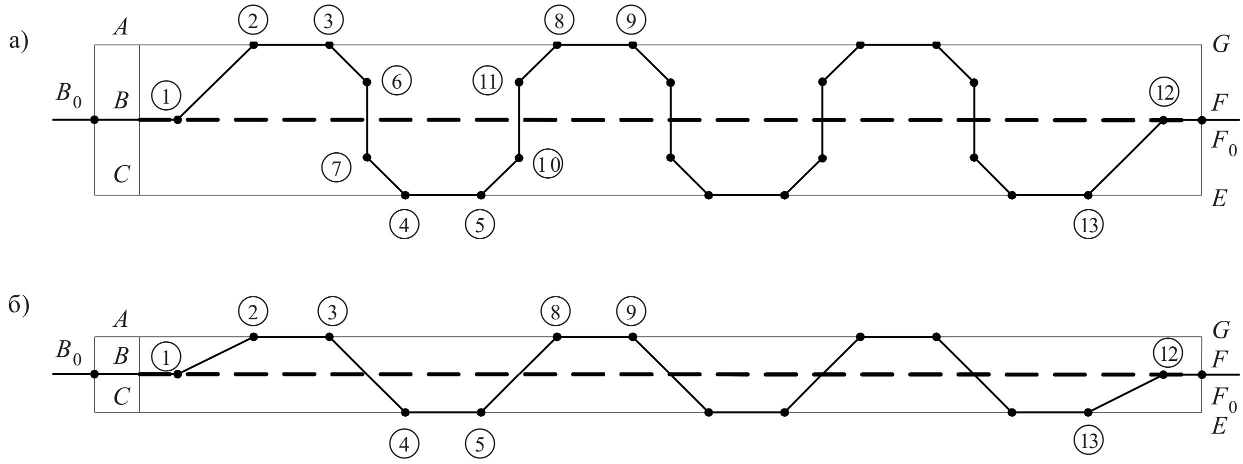

Рис. 36. Построение второй (*а*) и третьей (*б*) закритических змеек

тическая длина аппроксимированной змейки отличается от требуемой длины не больше чем на 30 нм.

Вторая и третья закритические змейки

Для формирования второй и третьей закритических змеек используется одна и та же процедура. На **рис. 36** приведены схемы построения змеек с характерными точками.

Формирование змейки происходит так же, как это описано в предыдущем разделе. Аналогично учитывается и избыток высоты трапеции. Вторая закритическая змейка отличается от третьей тем, что в последней отсутствуют вертикальные отрезки (*6–7*, *10–11*).

Основными величинами, используемыми для расчета характерных точек закритических змеек, являются величины *d*/4 и *d*/2. После того, как рассчитаны координаты групп точек первых изгибов, координаты точек для формирования следующих участков змейки вычисляются с использованием величины полупериода.

После вычисления координат точек *12* и *13* приступаем к подгонке длины. Здесь это можно сделать, перемещая точку *12* на величину ε_1 или ε_2, как показано на **рис. 37**, соответственно увеличивая или уменьшая длину змейки.

Фактическая длина змейки вычисляется как сумма длин уже созданных участков и участков, которые будут созданы между точками *13*, *12* и *F* при

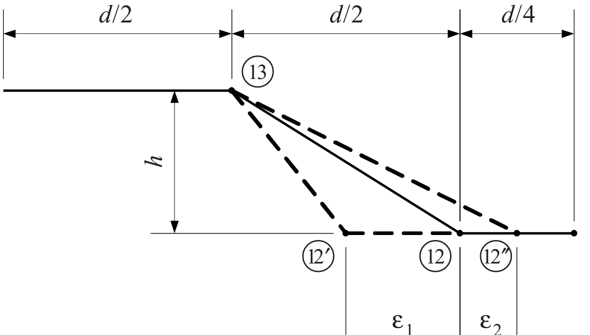

Рис. 37. Подгонка длины второй и третьей закритических змеек

подгонке. Для подгонки длины необходимо найти величину ε (равную ε_1 или ε_2), исходя из разницы требуемой и фактической длины (Δ).

Длина участков змейки между точками *13*, *12* и *F* сначала равна $\sqrt{\frac{d^2}{4}+h^2}+\frac{d}{4}$, а после перемещения точки *12* на величину ε станет равной

$$\sqrt{\left(\frac{d}{2}-\varepsilon\right)^2+h^2}+\frac{d}{4}+\varepsilon.$$

Тогда

$$\Delta=\sqrt{\frac{d^2}{4}+h^2}-\sqrt{\frac{d^2}{4}+h^2-d\cdot\varepsilon+\varepsilon^2}-\varepsilon.$$

Обозначив $c=\sqrt{\frac{d^2}{4}+h^2}$, получим

$\Delta=c-\sqrt{c^2-d\cdot\varepsilon+\varepsilon^2}-\varepsilon,$ откуда

$$\varepsilon=\frac{\Delta(\Delta-2c)}{2(c-\Delta)-d}. \qquad (39)$$

На значения величин ε_1 и ε_2 накладываются следующие ограничения:

— $|\varepsilon_1|$ не может превышать величину *d*/2 (чтобы не были нарушены заданные пользователем зазоры между проводниками внутри змейки);

— $|\varepsilon_2|$ не может превышать величину *d*/4 (чтобы змейка полностью была расположена в пределах заданной трапеции).

После того, как окончательные координаты точки *12* вычислены, создаются соответствующие участки змейки — отрезки между точками *13* и *12* и между точками *12* и *F*. Фактическая длина второй или третьей закритической змейки, полученная после подгонки, отличается от требуемой длины не больше чем на 30 нм.

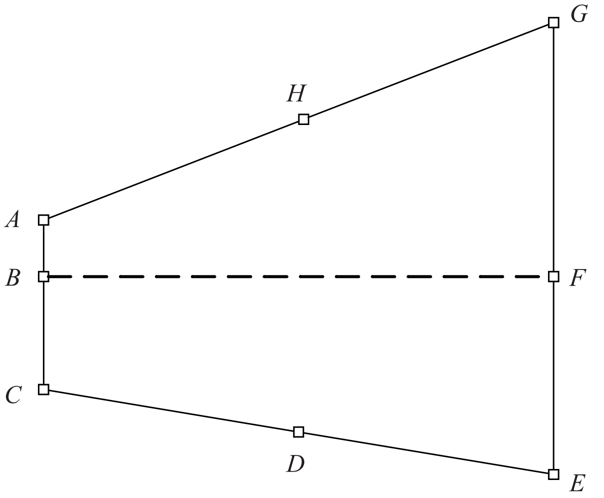

Рис. 38. Редактируемые маркеры трапеции

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ С ПРОГРАММОЙ

Для создания проводника заданной длины в САПР «TopoR» пользователь должен выделить сегмент проводника и вызвать команду «Превратить в змейку». Обратной командой змейку можно превратить в набор последовательных сегментов проводника (редактирование длины и габаритов трапеции станет невозможным).

На **рис. 38** отмечены маркеры, с помощью которых пользователь может редактировать габариты трапеции. (По умолчанию создается прямоугольник с минимально допустимыми габаритами). Маркеры *A* и *C* перемещаются только вдоль оси *AC*, *E* и *G* — только вдоль оси *EG*, *D* и *H* позволяют изменять размеры сразу обоих оснований трапеции. При нажатой клавише *Shift* перемещение одного из этих маркеров приводит к перемещению на то же расстояние противоположного (относительно оси *BF*), при этом оба маркера двигаются или к оси *BF*, или от нее.

Заключение

В САПР «TopoR» задача создания проводников заданной длины реализуется путем вписывания в произвольную трапецию проводника в форме серпантина. Использование трапеции, а не прямоугольника, как в большинстве других САПР, позволяет более экономно использовать монтажное пространство платы, что особенно актуально в условиях трассировки под произвольными углами.

При использовании разработанных алгоритмов задаваемая для создания проводников длина выдерживается с точностью не хуже 50 нм. В целях совместимости с форматами САПР, не поддерживающих работу с дугами, в САПР «TopoR» предусмотрено создание аппроксимированных змеек, состоящих только из отрезков прямых.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Елшин Ю. М. Справочное руководство по работе с подсистемой Specctra в P-CAD 2001/2002.— М.: Издательский дом «СОЛОН-Пресс», 2003.

2. Лузин С. Ю., Лячек Ю. Т., Полубасов О. Б. Автоматизация проектирования печатных плат. Система топологической трассировки TopoR: учебное пособие.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.

3. Лузин С. Ю., Полубасов О. Б. Топологический трассировщик печатных плат TopoR // Электронные компоненты.— 2005.— № 11.— С. 59—62.

4. Pulsonix Design System Version 4.0 Update Notes. WestDev Ltd., 2006.— Режим доступа: http://www.pulsonix.com/downloads/manuals/Pulsonix 4.0 Update Notes.pdf

5. Кнут Д. Искусство программирования, том 2. Получисленные алгоритмы.— М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Прогнозирование показателей надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств различных конструкций в режиме Q_{0max}. (Украина, г. Одесса)
- Оптимизация конструкции мембранных датчиков. (Республика Беларусь, г. Минск)
- Исследование корреляции параметров арсенидгаллиевых эпитаксиальных слоев с технологией процесса роста. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Разработка схемы и топологии элементов матрицы управляемых автоэмиссионных микрокатодов на КНИ-структурах. (Украина, г. Львов, г. Ивано-Франковск)
- Установка для измерения удельного коэффициента силы света материалов со световозвращающим эффектом. (Украина, г. Черновцы)
- Эффект усиления фототока в модифицированной фотодиодной структуре с прямо и обратно включенными переходами. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Метод оптимального управления процессом поиска неизвестного количества движущихся объектов. (Украина, г. Ялта)

- Матричные кремниевые микрокатоды для автоэмиссионных дисплеев. (Украина, г. Львов)
- Устройство сбора биометрических параметров с использованием полупроводниковых датчиков. (Украина, г. Одесса)
- Ультрафиолетовые фотоприемники на основе тонких пленок ZnS. (Украина, г. Киев)
- Способ определения доли кристаллов в стеклокерамическом диэлектрике. (Украина, г. Одесса)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции