

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Расчетно – графическая работа

РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

2.1. Конструкции пленочных конденсаторов

В зависимости от толщины пленок, применяемых при изготовлении, различают *тонкопленочные* и *толстопленочные* конденсаторы. На рис. 5 приведены наиболее распространенные конструкции пленочных конденсаторов. Конструкции, изображенные на рис. 5, (а–в) используются для конденсаторов с большой емкостью. В этих конструкциях неточность совмещения обкладок мало сказывается на изменении емкости, так как контур диэлектрика заходит за пределы обеих обкладок. Небольшое изменение емкости в первых двух конструкциях возможно за счет изменения вклада емкости вывода верхней обкладки при ее смещении относительно нижней. Для устранения этой погрешности с противоположной стороны вывода верхней обкладки делают *компенсатор* (рис. 5, в). Современная технология позволяет получить тонкопленочные конденсаторы с емкостью до 10^3 пФ. Такие конденсаторы могут иметь сложную фигурную конструкцию. Это позволяет конструктору при разработке топологии ИМС полностью использовать свободные участки площади подложки.

Толстопленочные конденсаторы, как правило, изготавливают прямоугольной (квадратной) формы без компенсаторов с емкостью 50–2500 пФ и допуском $\pm 15\%$.

При выборе конструкции пленочного конденсатора необходимо учитывать, что на высоких частотах (> 10 МГц) его емкость падает. Причем при двустороннем расположении выводов (рис. 5, а) этот спад меньше, чем при одностороннем (рис. 5, б). Конструкция, изображенная на рис. 5, г, используется для пленочных конденсаторов небольшой емкости (десятки пФ). Обычно для ее получения достаточно площадь взаимного перекрытия пересекающихся коммутационных проводников, разделенных пленкой диэлектрика.

При активной площади конденсатора менее 5 мм^2 начинает сказываться *краевой эффект*, поэтому при площади верхней обкладки менее 1 мм^2 рекомендуется использовать конструкцию, выполненную в виде последовательно соединенных конденсаторов (рис. 5, д). При малых емкостях (доли и единицы пФ) используют гребенчатую (рис. 5, е) или *полосковую* формы.

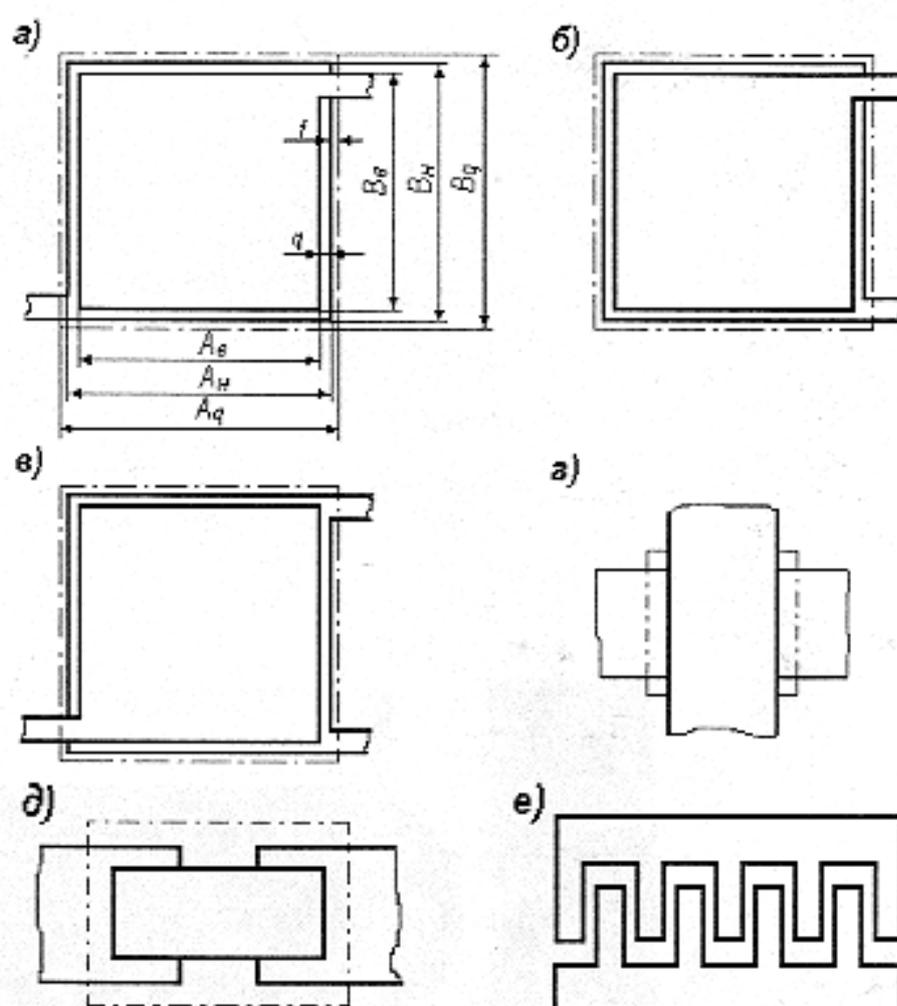


Рис. 5. Конструкция плёночных конденсаторов

2.2. Требования к материалам, их основные характеристики

Требования к материалам пленочного конденсатора определяются требованиями, предъявляемыми к самому изделию. Конденсаторы ИМС должны:

- занимать минимальную площадь;
- обладать хорошей добротностью;
- иметь высокую надежность;
- обладать высокой температурной и временной стабильностью.

Выполнение этих требований в большей степени зависит от материала диэлектрика. Поэтому он должен иметь хорошую адгезию к подложке и материалу обкладок, обладать высокой электрической прочностью и малыми потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и минимальную гигроскопичность, не разрушаться в процессе формирования пленок и быть

совместимым с технологическими процессами изготовления других элементов микросхем.

Диэлектрик тонкопленочных конденсаторов формируется методами *термического напыления, анодного окисления, ионно-плазменного и реактивного распыления*. Диэлектрические пасты для толстопленочных конденсаторов изготавливаются на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина пленки после термической обработки составляет 40–60 мкм. В таблице 2 приведены основные характеристики диэлектрических материалов, применяемых для изготовления пленочных конденсаторов.

Таблица 2

Свойства диэлектрических материалов для пленочных конденсаторов

Материал	ϵ , $f = 1$ КГц	$E_{пр} \cdot 10^6$, В/см	$\text{tg } \delta \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	$C_0 \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	$TKE \cdot 10^4$, 1/град $T = -60 \div + 85 \text{ } ^\circ\text{C}$
SiO ₂	4	10		20	2
SiO	6–8	1–2	1–2	5–10	1–2
GeO	10–12	0,5–0,8	5–7	5–20	3–5
Al ₂ O ₃	10	9	0,3 – 1,5	30–80	1,5–5
Ta ₂ O ₅	21–27	5	10	100	2–3
TiO ₂	30–100	0,24	26	10–100	3
Sb ₂ S ₃	18–21	0,3–0,5	4–10	1–1,5	5
АСС	5,2 – 5,5	3–5	3	30	1,5
БСС	3,9 – 4,2	3–5	1	15	0,2
ИБС	10–12	2–3	7	60	5
Паста					
ПК-12	—	$U_{пр} \geq 150 \text{ В}$	30 – 40	10	± 10
Паста					
ПК 1000-30	—	$U_{пр} \geq 150 \text{ В}$	36	3,7	± 10

АСС – алюмосиликатное стекло;

БСС – боросиликатное стекло, в состав которого входит 15 % В₂O₃ и 85 % SiO₂;

ИБС – иттрий-боритное стекло.

Диэлектрическая проницаемость ϵ является одной из важнейших характеристик диэлектрика и показывает, во сколько раз уменьшается кулоновское взаимодействие между зарядами при переносе их из вакуума в данную среду. Величина ϵ отражает увеличение емкости конденсатора при замене в нем вакуума диэлектриком.

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (20)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см – электрическая постоянная, S – площадь перекрытия пластин конденсатора, d – расстояние между ними.

Диэлектрическая проницаемость зависит от материала, температуры, частоты и напряженности поля.

Электрическая прочность $E_{\text{ПР}}$ диэлектрических пленок характеризуется напряженностью электрического поля, при которой происходит локальное разрушение диэлектрика с образованием проводящего канала: $E_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР}} / d$, где $U_{\text{ПР}}$ – пробивное напряжение, d – толщина диэлектрика. Пробой диэлектрических пленок вызывается, как тепловыми, так и электрическими процессами. Тепловой пробой обусловлен экспоненциальным ростом электропроводности диэлектрика при повышении его температуры.

Электрический пробой обусловлен туннельным переходом электронов в зону проводимости из валентной зоны, с примесных уровней или металлических электродов, а также лавинным размножением электронов за счет ударной ионизации в высоких электрических полях.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ является количественной мерой потерь в данном диэлектрике. Эти потери обусловлены свойствами материала диэлектрика и определяются суммой миграционных и дипольно-релаксационных потерь. Миграционные потери связаны со сквозной электропроводностью в диэлектрике, уменьшаются с увеличением частоты по гиперболическому закону и увеличиваются по экспоненциальному закону с ростом температуры. Дипольно-релаксационные потери обусловлены процессами ориентации диполей в электрическом поле при их хаотических, обусловленных тепловым движением, колебаниях около среднего положения равновесия.

Материал обкладок тонкопленочного конденсатора должен обладать высокой электропроводностью, малой миграционной подвижностью атомов для предотвращения диффузии в диэлектрик, хорошей адгезией как к подложке, так и ранее сформированным пленкам, невысокой температурой нанесения и достаточной химической стойкостью. Материал нижней обкладки конденсатора должен иметь минимальное количество микронеровностей высотой не более 0,025 мкм.

Из всех металлов с высокой проводимостью (Au, Ag, Cu, Al) только последний наиболее полно удовлетворяет перечисленным требованиям. Другие из названных металлов не нашли применения в основном из-за высокой миграционной подвижности атомов. Часто, при изготовлении обкладок конденсатора из алюминия, применяют подслои из титана или ванадия.

Толстопленочные проводниковые пленки, кроме выполнения общих требований, должны быть совместимыми с диэлектрическими пастами. Проводниковые пасты изготавливаются на основе золота, золота–платины, золота–палладия, палладия–серебра, индия, рения. Пасты на основе золота обеспечивают наиболее низкое поверхностное сопротивление ($R_s = 0,001 - 0,003$ Ом / □).

2.3. Основные параметры конденсатора

1. Номинальная емкость C_H – задается условиями схем и определяется по известной формуле

$$C_H = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} = C_0 \cdot S = C_0 \cdot A_B B_B,$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная ($\epsilon_0 = 0,0885$ пФ/см);

C_0 – удельная емкость ($C_0 = 0,0885(\epsilon/d)$ пФ/см²);

ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь взаимного перекрытия обкладок.

При определении C_H пленочных конденсаторов малой площади необходимо учитывать увеличение емкости, обусловленное влиянием краевого эффекта. В общем случае

$$C_H = K \cdot C_0 \cdot S, \quad (21)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние краевого эффекта

$$K = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{C_H}{C_0} > 5 \text{ мм}^2; \\ 1,3 - 0,06 \frac{C_H}{C_0}, & \text{если } 1 \leq \frac{C_H}{C_0} \leq 5 \text{ мм}^2. \end{cases}$$

Емкость гребенчатого конденсатора определяется по формуле

$$C = \beta \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot l; \quad (22)$$

где β – коэффициент, определяемый из графика (рис. 6);

ϵ_1, ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость материала подложки и среды;

l – длина совместной границы 2-х проводников гребенки.

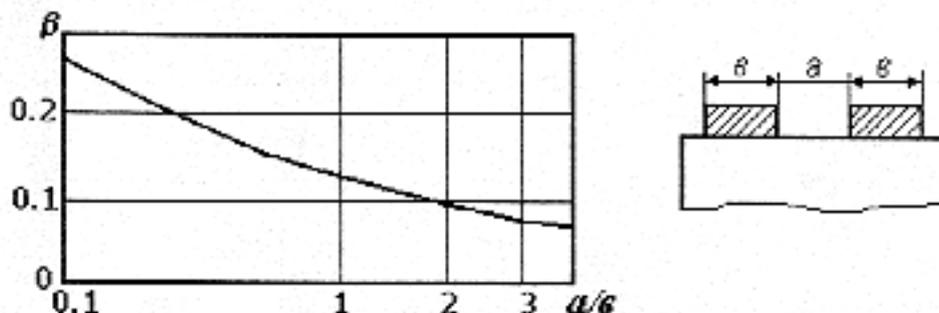


Рис. 6. Коэффициент β

2. Рабочее напряжение U_p обеспечивается подбором материала диэлектрической пленки с необходимыми значениями $E_{\text{ДПР}}$ и толщины пленки d . Толщина пленки d , выбираемая из условия обеспечения заданного U_p , определяется из выражения

$$d = \eta \cdot U_p / E_{\text{ДПР}}, \quad (23)$$

где η – коэффициент запаса, обеспечивающий надежные характеристики. Для пленочных конденсаторов коэффициент запаса выбирается равным $2 \div 10$. Коэффициент запаса $\eta = 5 \div 10$ выбирается для расчета конденсаторов повышенной надежности.

3. Добротность пленочного конденсатора Q зависит от его конструкции используемых материалов. Она определяется потерями в диэлектрике и в обкладках конденсатора

$$Q = (\text{tg } \delta)^{-1} = (\text{tg } \delta_g + \text{tg } \delta_{\text{обкл}})^{-1}, \quad (24)$$

где $\text{tg } \delta_{\text{обкл}}$ – тангенс угла потерь в обкладках и выводах конденсатора;

$$\text{tg } \delta_{\text{обкл}} = 2\pi \cdot f_{\text{раб}}(r_{\text{обкл}} + r_{\text{В}}) \cdot C, \quad (25)$$

$r_{\text{обкл}}$ – последовательное сопротивление обкладок;

$r_{\text{В}}$ – сопротивление выводов.

Сопротивление $r_{\text{обкл}}$ зависит от конструкции конденсатора, проводимости материалов обкладок, их геометрических размеров, а также картины распределения линий тока в обкладках. Для конденсаторов с 2-сторонним расположением выводов

$$r_{\text{обкл}} \approx (r_{\text{он}} + r_{\text{ов}})/3,$$

где $r_{\text{он}}$ и $r_{\text{ов}}$ – сопротивление нижней и верхней обкладок. Добротность пленочного конденсатора $Q = 10 \div 100$. В практических расчетах $\text{tg } \delta$ – справочная величина.

Тангенс угла диэлектрических потерь существенно зависит от частоты сигнала и температуры окружающей среды.

Относительная погрешность емкости N_C

$$N_C = N_{C0} + N_{CT} + N_S + N_{C_{\text{св}}} \quad (26)$$

где N_{C0} – относительная погрешность C_0 , характеризующая воспроизводимость этой величины в условиях данного производства.

N_S – относительная погрешность активной площади

$$N_S = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta A \cdot B + \Delta B \cdot A}{A \cdot B}, \quad (27)$$

где ΔS , ΔA , ΔB – соответственно абсолютные погрешности S , A и B верхней обкладки пленочного конденсатора N_S минимальна, если обкладки пленочного конденсатора имеют квадратную форму. Отклонение контура верхней обкладки от квадрата увеличивает N_S для учета этих отклонений используют коэффициент формы $K_\phi = A/B$.

Тогда при $\Delta A = \Delta B$

$$N_S = \Delta A \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{K_\phi} \cdot S}. \quad (28)$$

N_{CT} – относительная температурная погрешность

$$N_{CT} = (1/C_{II}) \cdot (dC/dT) \cdot (T_{max} - T_{мин}) = \alpha_C (T_{max} - 20^\circ C), \quad (29)$$

где $\alpha_C = (1/C) \cdot (dC/dT)$ – ТКЕ, выбираемый из табличных данных.

Коэффициент старения $N_{Cст}$ определяет изменение емкости пленочного конденсатора, которое происходит вследствие деградационных явлений в пленке диэлектрика за время Δt :

$$N_{Cст} = (\Delta C/C)/\Delta t \approx N_{CT} \epsilon, \quad (30)$$

где $N_{CT} \epsilon$ – коэффициент старения диэлектрической проницаемости.

Для обеспечения заданной точности емкости при изготовлении пленочного конденсатора необходимо, чтобы выполнялось условие

$$N_S \leq N_{S доп}, \quad (31)$$

где $N_{S доп}$ – максимально допустимая относительная погрешность активной площади, которая может быть определена, как

$$N_{S доп} = N_C - N_{CB} - N_{CT} - N_{Cст}. \quad (32)$$

Подставляя значение

$$N_S = \Delta A \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{K_\phi} \cdot S}$$

в условие (31), получим

$$S \geq \left(\frac{\Delta A}{N_{S \text{ доп}}} \right) \cdot \frac{(1 + K_\phi)^2}{K_\phi} \quad (33)$$

После этого можно определить минимальную удельную емкость, обеспечивающую заданную точность

$$C_{0 \text{ точн}} = \frac{C}{S} = C \left(\frac{N_{S \text{ доп}}}{\Delta A} \right) \cdot \frac{K_\phi}{(1 + K_\phi)^2} \quad (34)$$

В частном случае когда $K_\phi = 1$

$$C_{0 \text{ точн}} = C \left(\frac{N_{S \text{ доп}}}{2\Delta A} \right)^2 \quad (35)$$

2.4. Порядок расчета тонкопленочного конденсатора

Расчет тонкопленочных конденсаторов производится в следующей последовательности:

1. Из табличных данных (например, табл. 2) выбирают диэлектрик с определенными значениями ϵ и $E_{\text{пр}}$ малыми значениями ТКЕ, $\text{tg } \delta$ и $K_{\text{ст}}$ (если они не заданы).

2. Из условия $d_{\text{мин}} \geq (\eta \cdot U_p) / E_{\text{пр}}$ определяют минимальную толщину диэлектрика, обеспечивающего необходимое значение U_p .

Обычно выбирается η равным 2–3.

3. Определяют удельную емкость конденсатора исходя из условия электрической прочности:

$$C_{0U} = 0,0885 \cdot (\epsilon / d).$$

4. Оценивают относительную температурную погрешность N_{CT} исходя из условия (29) и допустимую погрешность активной площади конденсатора $N_{S \text{ доп}}$ (из условия 32). Если получится, что $N_{S \text{ доп}} \leq 0$, то изготовление конденсатора с заданной точностью невозможно. Нужно выбрать другой диэлектрик с меньшим ТКЕ и $N_{C \text{ ст}}$.

5. Используя выражение (34) или (35), определяют удельную емкость $C_{0 \text{ точн}}$ с учетом точности его изготовления.

6. Выбирают минимальное значение удельной емкости из условия

$$C_0 \leq \min \{C_{0 \text{ доп}}, C_{0 \text{ точн}}\}, \quad (36)$$

которое обеспечивает заданное U_p и требуемое N_C .

7. По заданному значению C_H и полученному из (36) значению C_0 определяют коэффициент K , учитывающий краевой эффект.

8. С учетом коэффициента K по (21) определяют площадь перекрытия обкладок конденсатора. При этом, если окажется $S < 1 \text{ мм}^2$, то выбирают диэлектрик с меньшим ε или большей толщиной. Если это не дает желаемых результатов, то изменяют конструкцию конденсатора.

9. Определяют толщину d , соответствующую выбранному значению C_0 .

10. Рассчитывают размеры обкладок и диэлектрика конденсатора. Для этого выбирают форму и определяют коэффициент K_ϕ . Если выбрана прямоугольная форма, то геометрические размеры верхней обкладки

$$A_B = \sqrt{S \cdot K_\phi}; \quad B_B = \frac{A_B}{K_\phi};$$

Если $K_\phi = 1$, то $A_B = B_B = \sqrt{S}$. Полученные размеры A_B и B_B округляют до значений, кратных шагу координатной сетки с учетом масштаба топологического чертежа. После этого, с учетом допусков на перекрытие, определяют размеры нижней обкладки:

$$A_H = A_B + 2(q + \beta); \quad B_H = B_B + 2(q + \beta), \quad (37)$$

где q – коэффициент перекрытия, β – погрешность совмещения обкладок.

Размеры диэлектрика.

$$A_d = A_H + 2(f + \beta); \quad B_d = B_H + 2(f + \beta), \quad (38)$$

где f – коэффициент перекрытия нижней обкладки и диэлектрика.

11. Определяют занимаемую площадь $S = A_d \cdot B_d$.

12. Если заданы $\text{tg } \delta$ и Q , то по (24 и 25) определяют их значения для рассчитанного конденсатора. Полученные диэлектрические потери не должны превышать заданных значений.

13. Вычерчивают топологический чертеж.

При проектировании группы конденсаторов расчет начинают, как правило, с конденсатора, имеющего наименьшее значение C_H .

2.5. Пример расчета тонкопленочного конденсатора

Дано: $C_H = 1000 \text{ пФ}$; $N_C = 15 \%$; $U_p = 20 \text{ В}$; $T = (-40 \div +80) \text{ }^\circ\text{C}$; длительность эксплуатации ИМС 1000 часов.

Технологические погрешности $N_{C_0} = \pm 8\%$; $\Delta A = \Delta B = \beta = 20$ мкм; $q = f = 100$ мкм.

Принимаем $\eta = 3$. Масштаб чертежа топологии 20 : 1. Координатная сетка – миллиметровка.

1. Для диэлектрического слоя выбираем монооксид германия ($\varepsilon = 10$, $\text{tg } \delta = 0,001$; $E_{пр} = 100$ В/мкм; $\alpha_C = 5 \cdot 10^{-4}$ 1/град; $N_{C_{см}} = -1\%$).

2. Толщина диэлектрика $d_{\min} = 3 \cdot 20 / 10 = 0,6$ мкм.

3. Находим удельную емкость

$$C_{0u} = 0,0885 \cdot \frac{\varepsilon}{d} = 0,0885 \cdot \frac{10}{0,6 \cdot 10^{-4}} = 1,475 \cdot 10^4 \text{ пФ/см}^2 = 147,5 \text{ пФ/мм}^2.$$

4. Температурная погрешность емкости

$$N_{C_T} = 5 \cdot 10^{-4} (80 - 20) \cdot 100 = 3\%,$$

а допустимая погрешность активной площади конденсатора

$$N_{C_{зеп}} = 15 - 8 - 3 - 1 = 3\%.$$

5. Определяем удельную емкость конденсатора, исходя из заданной погрешности

$$C_{0_{\text{норм}}} = 1000 \left[\frac{0,03}{2 \cdot 0,02} \right]^2 = 562,5 \text{ пФ/мм}^2.$$

6. Выбираем величину C_0 с учетом обоих условий: $C_0 = 140$ пФ/мм²

7. Так как $\frac{C_H}{C_0} > 5$ мм², то коэффициент $K = 1$.

8. Площадь перекрытия обкладок $S = 1000 / 1 \cdot 140 = 7,14$ мм².

9. Толщина диэлектрика, соответствующая выбранному значению C_0 .

$$d = 0,0885 \cdot \frac{10}{140 \cdot 100} = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0,63 \text{ мкм}.$$

10. Определяем геометрические размеры обкладок и диэлектрика конденсатора:

$$A_{\text{врасч}} = B_{\text{врасч}} = \sqrt{7,14} = 2,67 \text{ мм}.$$

С учетом шага координатной сетки

$$A_{B\text{топ}} = B_{B\text{топ}} = 2,675 \text{ мм},$$

$$A_{H\text{расч}} = B_{H\text{расч}} = 2,675 + 2 \cdot (0,1 + 0,02) = 2,915 \text{ мм},$$

$$A_{H\text{топ}} = B_{H\text{топ}} = 2,925 \text{ мм},$$

$$A_{д\text{расч}} = B_{д\text{расч}} = 2,925 + 2(0,1 + 0,02) = 3,165 \text{ мм},$$

$$A_{д\text{топ}} = B_{д\text{топ}} = 3,175 \text{ мм}.$$

11. Площадь, занимаемая конденсатором $S = 3,175^2 \approx 10 \text{ мм}^2$.

12. Составляем топологию рассчитанного конденсатора (рис. 7).

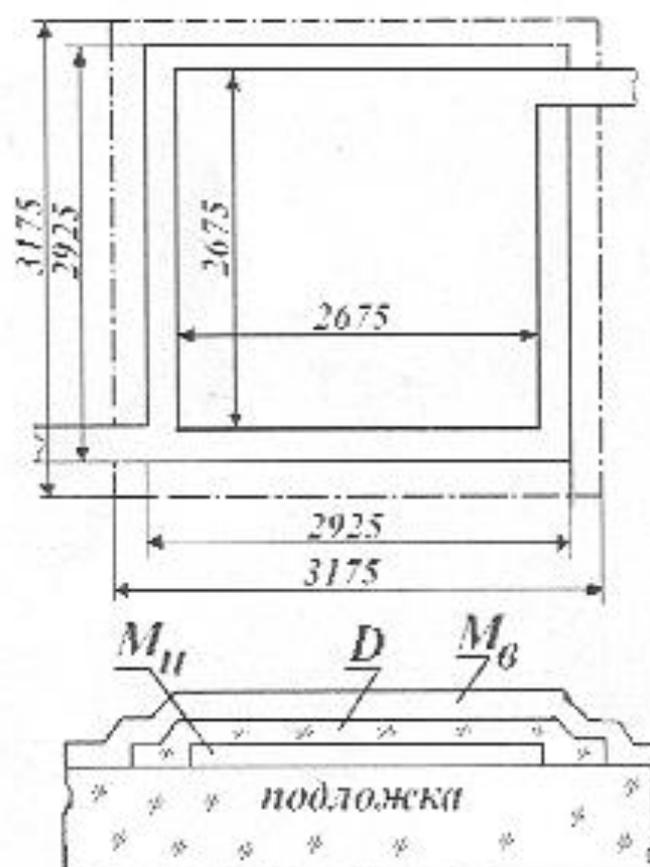


Рис. 7. Топологический чертёж конденсатора (масштаб не соблюдался)

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

	1	2	3	4	5	6	7
C_H (пФ)	100	500	1000	1500	2000	2500	300
N_c (%)	15	10	15	10	15	10	15
U_p (в)	20	30	20	50	50	20	20

Длительность эксплуатации 1000 часов

Технологические погрешности $N_{Co} = 8\%$; $\Delta A = \Delta B = \beta = 20$ мкм; $q = f = 100$ мкм;

$\eta = 3$. Масштаб чертежа топологии 20 : 1.