

2 Расчет схемы стабилизации напряжения на нагрузке при помощи кремниевого стабилитрона

2.1 Условие задачи

Разработать схему стабилизации напряжения на нагрузке при помощи кремниевого стабилитрона (КС), если входное напряжение $U_{ВХ}$ изменяется от

$$U_{ВХ\ MIN} = (30 + 1,5 \cdot N) \cdot G, \text{ В до } U_{ВХ\ MAX} = 35 + (30 + 2 \cdot N) \cdot G, \text{ В,}$$

а ток и напряжение нагрузки соответственно равны

$$I_H = 150 - N \cdot G, \text{ мА; } \quad U_H = (15 + N) \cdot G, \text{ В,}$$

где G – номер группы студента, N – номер студента по журналу деканата.

Для этого требуется выполнить следующее:

1. Выбрать схему стабилизации напряжения.
2. Выбрать тип КС (из справочника или из таблицы 2.1).
3. Определить необходимое число последовательно включенных КС.
4. Рассчитать и выбрать сопротивление ограничительного резистора R_0 .
5. Проверить возможность стабилизации напряжения во всем диапазоне изменения входного напряжения $U_{ВХ}$.
6. Рассчитать величину сопротивления добавочного резистора R_D .
7. Начертить рассчитанную схему, указав на ней параметры всех элементов.
8. Определить при напряжениях входа равных $U_{ВХ\ MIN}$, $U_{ВХ\ СР}$ и $U_{ВХ\ MAX}$ следующие величины:
 - 8.1. Входные токи схемы $I_{ВХ\ MIN}$, $I_{ВХ\ СР}$, $I_{ВХ\ MAX}$.
 - 8.2. Токи стабилитрона $I'_{СТ\ MIN}$, $I'_{СТ\ СР}$, $I'_{СТ\ MAX}$.
 - 8.3. Падение напряжения на R_0 $U_{R0\ MIN}$, $U_{R0\ СР}$, $U_{R0\ MAX}$.
 - 8.4. Падение напряжения на R_D .
 - 8.5. Напряжение на нагрузке $U_{H\ MIN}$, $U_{H\ СР}$, $U_{H\ MAX}$.
9. В III квадранте прямоугольной системы координат (ось абсцисс — U , ось ординат — I) построить следующие графики:
 - 9.1. ВАХ одного окончательно выбранного КС.
 - 9.2. ВАХ S последовательно включенных КС.
 - 9.3. График $I'_{СТ} = f(U_{ВХ})$.
 - 9.4. Область падения напряжения на R_0 .
 - 9.5. Область падения напряжения в R_D .

9.6. На графиках показать и подписать численные значения U_{CT} , $S \cdot U_{CT}$, $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$, $U_{BX MAX}$, $U_{R0 MIN}$, $U_{R0 CP}$, $U_{R0 MAX}$, $I_{CT MIN}$, $I_{CT MAX}$, $I'_{CT MIN}$, $I'_{CT CP}$, $I'_{CT MAX}$, U_H .

10. Дать краткое описание работы схемы при $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$ и $U_{BX MAX}$.

Таблица 2.1 – Типы и паспортные параметры некоторых стабилизаторов

Тип КС	U_{CT} , В	$I_{CT MIN}$, мА	$I_{CT MAX}$, мА
Д815А	5,6	50	1400
Д815Г	10	25	800
Д815Е	15	25	550
Д815Ж	18	25	450
Д816А	22	10	230
Д816Б	27	10	180
Д816В	33	10	150
Д816Г	36	10	130
Д816Д	47	10	110
Д817А	56	5	90
Д817Б	68	5	75
Д817В	82	5	60
Д817Г	100	5	50
КС620	120	5	42
КС630А	130	5	38
КС650А	150	2,5	33
КС680А	180	2,5	28

2.2 Пример решения задачи

Решим задачу для варианта $G = 5$ и $N = 38$. Исходные данные сведем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 — Исходные данные для решения задачи

$U_{BX MIN}$, В	$U_{BX MAX}$, В	I_H , мА	U_H , В
190	250	70	90

2.2.1 Выбор схемы стабилизации напряжения

Из всех схем стабилизации напряжения на нагрузке при помощи КС выбираем простейшую (рисунок 2.1).

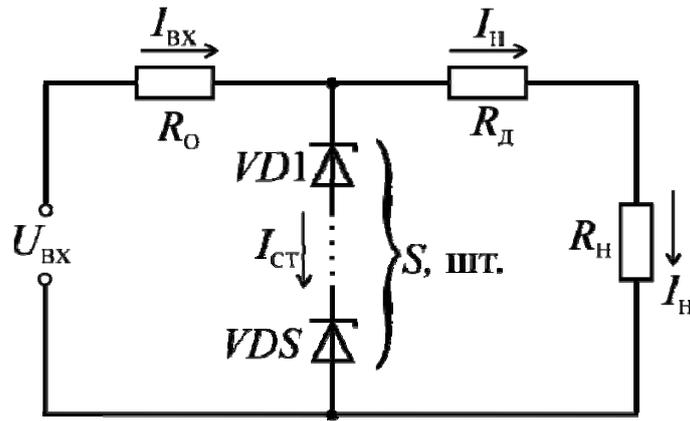


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема стабилизации напряжения

2.2.2 Выбор типа стабилитрона

Чтобы число КС в схеме было минимальным, выбираем из таблицы 2.1 стабилитрон, у которого $U_{СТ} \geq U_Н$. Этому условию удовлетворяет Д817Г с $U_{СТ} = 100 \text{ В} > U_Н = 90 \text{ В}$.

2.2.3 Расчет числа последовательно включенных стабилитронов

Число последовательно включенных стабилитронов находим по формуле

$$S' = \frac{U_Н}{U_{СТ}} = \frac{90}{100} = 0,9 \text{ шт.}$$

Принимаем $S = 1$ шт.

Предварительно правильность выбора КС проверяем по следующему условию:

$$U_{ВХ \text{ MIN}} > U_{СТ} \cdot S \quad \text{или} \quad 190 > 100 \cdot 1 = 100.$$

2.2.4 Расчет сопротивления ограничительного резистора

Для расчета величины сопротивления ограничительного резистора необходимо вначале определить следующие величины:

$$U_{ВХ \text{ CP}} = \frac{U_{ВХ \text{ MIN}} + U_{ВХ \text{ MAX}}}{2} = \frac{190 + 250}{2} = 220 \text{ В.}$$

$$I_{СТ \text{ CP}} = \frac{I_{СТ \text{ MIN}} + I_{СТ \text{ MAX}}}{2} = \frac{5 + 50}{2} = 27,5 \text{ мА.}$$

Находим величину сопротивления ограничительного резистора

$$R'_o = \frac{U_{ВХСР} - U_{СТ} \cdot S}{I_{СТСР} + I_H} = \frac{220 - 100 \cdot 1}{27,5 + 70} = 1,231 \text{ кОм.}$$

Из таблицы 2.3 выбираем резистор с ближайшей величиной стандартного сопротивления — $R_o = 1,2 \text{ кОм}$.

Таблица 2.3 — Шкала номинальных сопротивлений резисторов ($R \cdot 10^n$, Ом, где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$)

1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

2.2.5 Проверка возможности стабилизации

Проверка возможности стабилизации напряжения производится по условию

$$\Delta U_{ВХ} \leq \Delta I_{СТ} \cdot R_o \quad \text{или} \quad (U_{ВХ MAX} - U_{ВХ MIN}) = (I_{СТ MAX} - I_{СТ MIN}) \cdot R_o.$$

Подставив в последнее неравенство исходные данные и параметры выбранного КС, получим

$$(250 - 190) = 60 \text{ В}; \quad (50 - 5) \cdot 1,2 = 54 \text{ В или } 60 \text{ В} > 54 \text{ В.}$$

Условие проверки не выполняется. Это говорит о том, что колебания входного напряжения ($\Delta U_{ВХ}$) не компенсируются изменением падения напряжения на ограничительном резисторе ($\Delta I_{СТ} \cdot R_o$). Результаты расчета заносим в таблицу 2.4.

Выбираем новый КС с большим диапазоном изменения $I_{СТ MAX} - I_{СТ MIN}$ (из таблицы 2.1 — Д817В). Повторив расчеты по п. 2.2.2 — 2.2.5, сводим результаты в таблицу 2.4. Условие проверки ($60 \text{ В} > 30,8 \text{ В}$) вновь не выполняется.

Продолжаем расчеты с другими КС до тех пор, пока условие проверки не выполнится. Все результаты расчета заносим в таблицу 2.4.

Условие проверки выполняется при КС типа Д817А ($60 \text{ В} < 77,35 \text{ В}$), который и принимаем для дальнейших расчетов.

Таблица 2.4 – Результаты выбора стабилитрона и проверки стабилизации

Тип КС	$U_{СТ},$ В	$\frac{I_{СТ MIN}}{I_{СТ MAX}},$ мА	$\frac{S'}{S},$ шт.	$\frac{U_{ВХ MIN}}{U_{СТ} \cdot S},$ В	$\frac{R'_O}{R_O},$ Ом	$\frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_{СТ} \cdot R_O},$ В
Д817Г	100	$\frac{5}{50}$	$\frac{0,9}{1}$	$\frac{190}{100}$	$\frac{1,231}{1,2}$	$\frac{60}{54}$
Д817В	82	$\frac{5}{60}$	$\frac{1,098}{2}$	$\frac{190}{164}$	$\frac{0,5463}{0,56}$	$\frac{60}{30,8}$
Д817Б	68	$\frac{5}{75}$	$\frac{1,324}{2}$	$\frac{190}{136}$	$\frac{0,7636}{0,75}$	$\frac{60}{52,5}$
Д817А	56	$\frac{5}{90}$	$\frac{1,607}{2}$	$\frac{190}{112}$	$\frac{0,9191}{0,91}$	$\frac{60}{77,35}$

2.2.6 Расчет сопротивления добавочного резистора

Расчет сопротивления добавочного резистора выполним по следующему выражению:

$$R_D = \frac{U_{СТ} \cdot S - U_H}{I_H} = \frac{56 \cdot 2 - 90}{70} = 0,3143 \text{ кОм.}$$

Из таблицы 2.3 выбираем ближайшую стандартную величину сопротивления добавочного резистора $R_D = 0,3 \text{ кОм.}$

2.2.7 Окончательная схема стабилизации напряжения

Изобразим окончательную схему (рисунок 2.2) и укажем на ней параметры всех элементов. Для этого еще необходимо определить величину сопротивления нагрузки R_H

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{90}{70} = 1,286 \text{ кОм.}$$

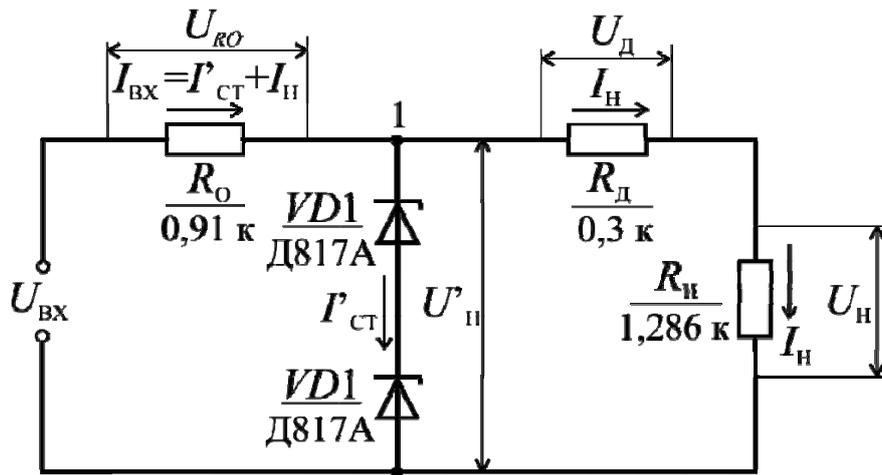


Рисунок 2.2 – Расчетная схема стабилизации напряжения

2.2.8 Расчет токов и напряжений схемы

Найдем токи и напряжения, действующие в схеме по рисунку 2.2.

2.2.8.1 Для определения входного тока схемы составим уравнение по II закону Кирхгофа для входного контура (рисунок 2.2):

$$U_{BX} = U_{RO} + U_{CT} \cdot S = I_{BX} \cdot R_O + U_{CT} \cdot S.$$

Отсюда получим

$$I_{BX} = \frac{U_{BX} - U_{CT} \cdot S}{R_O}.$$

Найдем значения входного тока I_{BX} при $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$ и $U_{BX MAX}$:

$$I_{BX MIN} = (190 - 56 \cdot 2) / 0,91 = 85,71 \text{ мА};$$

$$I_{BX CP} = (220 - 56 \cdot 2) / 0,91 = 118,7 \text{ мА};$$

$$I_{BX MAX} = (250 - 56 \cdot 2) / 0,91 = 151,6 \text{ мА}.$$

2.2.8.2 Чтобы определить ток стабилитрона, воспользуемся I законом Кирхгофа для узла 1 (рисунок 2.2):

$$I_{BX} = I'_{CT} + I_H \quad \text{или} \quad I'_{CT} = I_{BX} - I_H.$$

Найдем значения тока стабилитрона при $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$ и $U_{BX MAX}$:

$$I'_{CT MIN} = 85,71 - 70 = 15,71 \text{ мА};$$

$$I'_{CT CP} = 118,7 - 70 = 48,7 \text{ мА};$$

$$I'_{CT MAX} = 151,6 - 70 = 81,6 \text{ мА}.$$

2.2.8.3 Выражение для определения падения напряжения на ограничительном резисторе нетрудно записать при помощи закона Ома:

$$U_{RO} = I_{BX} \cdot R_O.$$

Найдем значения U_{RO} при $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$ и $U_{BX MAX}$:

$$U_{RO MIN} = 85,71 \cdot 0,91 = 78 \text{ В};$$

$$U_{RO CP} = 118,7 \cdot 0,91 = 108 \text{ В};$$

$$U_{RO MAX} = 151,6 \cdot 0,91 = 138 \text{ В}.$$

2.2.8.4 Очевидно, что падения напряжения на добавочном резисторе не зависят от величины входного напряжения и при любом U_{BX} может быть найдено по закону Ома

$$U_D = I_H \cdot R_D = 70 \cdot 0,3 = 21 \text{ В}.$$

2.2.8.5 Напряжение на зажимах двух последовательно включенных стабилитронов U'_H (рисунок 2.2) может быть определено по II закону Кирхгоффа

$$U'_H = U_{BX} - U_{RO},$$

а напряжение на нагрузке, с учетом падения напряжения на добавочном резисторе —

$$U_H = U'_H - U_D.$$

Найдем величины U'_H и U_H при $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$ и $U_{BX MAX}$:

$$U'_{H MIN} = 190 - 78 = 112 \text{ В};$$

$$U'_{H CP} = 220 - 108 = 112 \text{ В};$$

$$U'_{H MAX} = 205 - 138 = 112 \text{ В},$$

$$U_{H MIN} = 112 - 21 = 91 \text{ В};$$

$$U_{H CP} = 112 - 21 = 91 \text{ В};$$

$$U_{H MAX} = 112 - 21 = 91 \text{ В}.$$

Сведем все результаты расчетов в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 — Результаты расчета токов и напряжений схемы стабилизации при $R_D = 0,3$ кОм и $R_H = 1,286$ кОм

Величина	$U_{BX MIN} = 190$ В	$U_{BX CP} = 220$ В	$U_{BX MAX} = 250$ В
I_{BX} , мА	85,71	118,7	151,6
I'_{CT} , мА	15,71	48,68	81,65
U_{RO} , В	78	108	138
U_D , В	21	21	21
U'_H , В	112	112	112
U_H , В	91	91	91

2.2.9 Графическое построение

Пользуясь таблицей 2.5, проиллюстрируем графически на рисунке 2.3 работу схемы (рисунок 2.2) стабилизации напряжения на нагрузке. Максимальное значение оси абсцисс (ось напряжений) следует принять больше или равным значению $U_{BX MAX}$ (250 В), а максимальное значение оси ординат (ось токов) — больше или равным значению $I_{CT MAX}$ (90 мА).

2.2.9.1 Строим ВАХ одного окончательно выбранного КС (Д817А). Так как согласно исходным данным (таблица 2.1) $U_{CT} = \text{const} = 56$ В при изменении тока стабилизатора от $I_{CT MIN}$ до $I_{CT MAX}$, то ВАХ пойдет вертикально вниз. Первая точка ВАХ (т. А) будет иметь координаты U_{CT} и $I_{CT MIN}$ (56 В и 5 мА), а вторая (т. В)— U_{CT} и $I_{CT MAX}$ (56 В и 90 мА). Достроив график на участках OA и BC , получим ВАХ КС (линия 1 на рисунке 2.3).

2.2.9.2 Строим ВАХ S последовательно включенных КС (2 стабилизатора Д817А). График строится аналогично п. 2.2.9.1, с той лишь разницей, что первая точка ВАХ (т. D) будет иметь координаты $S \cdot U_{CT}$ и $I_{CT MIN}$ (2·56 В и 5 мА), а вторая (т. E) — $S \cdot U_{CT}$ и $I_{CT MAX}$ (2·56 В и 90 мА). Достроив график на участках OD и EF , получим ВАХ двух последовательно включенных КС (рисунок 2.3). На этой ВАХ покажем участок, который является рабочим для рассчитываемой схемы. Он будет находиться между т. G и т. H (рисунок 2.3), которые соответствуют токам $I'_{CT MIN}$ (15,71 мА) и $I'_{CT MAX}$ (81,65 мА), протекающим по стабилизатору, когда входные напряжения равны соответственно $U_{BX MIN}$ (190 В) и $U_{BX MAX}$ (250 В) (линия 2 на рисунке 2.3).

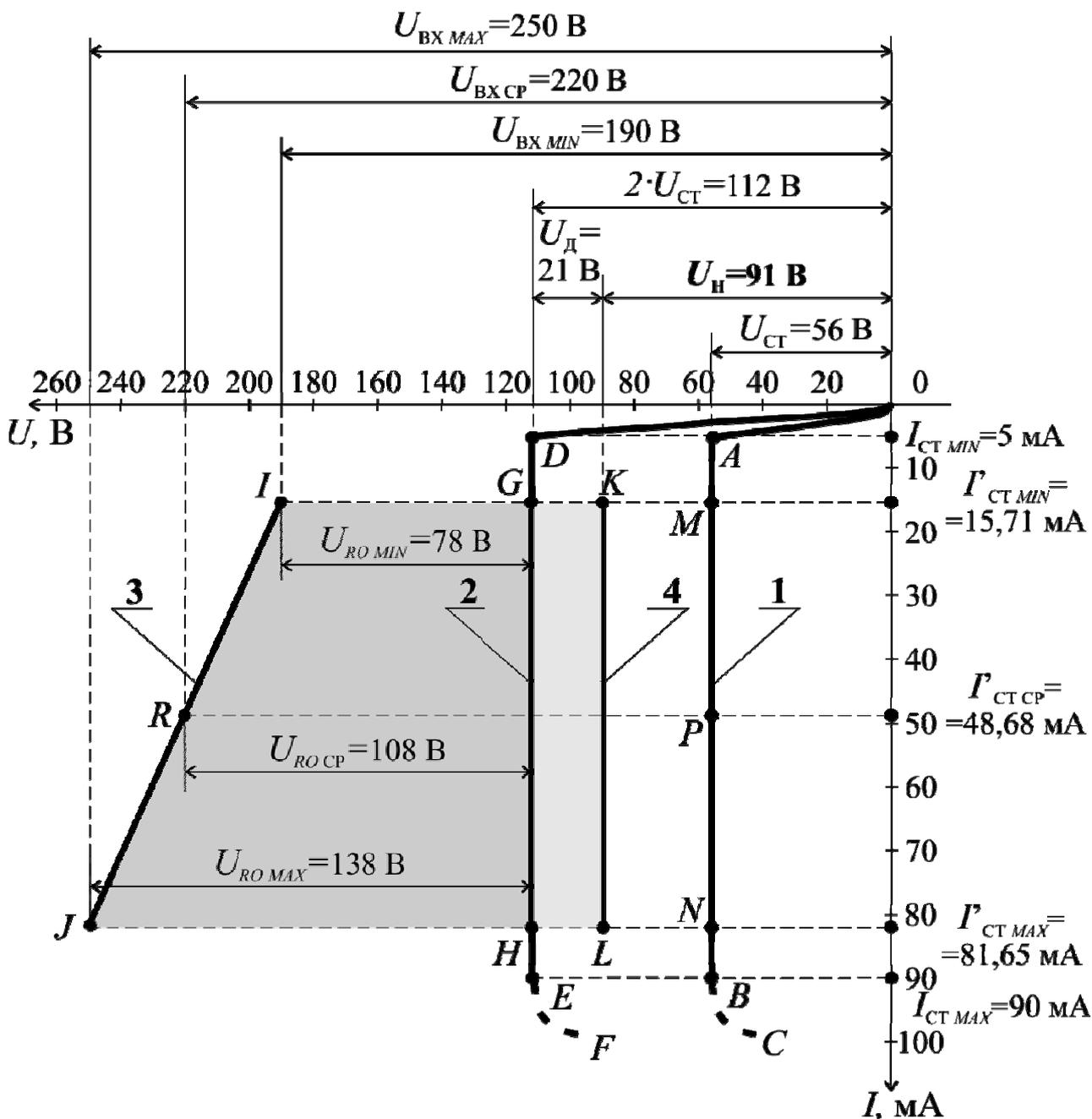


Рисунок 2.3 – Графическая иллюстрация работы схемы стабилизации напряжения на нагрузке

2.2.9.3 График $I'_{CT} = f(U_{BX})$ также построим по двум точкам. Когда на вход схемы подается напряжение $U_{BX MIN}$, по стабилизатору протекает ток $I'_{CT MIN}$. Когда на вход схемы подается напряжение $U_{BX MAX}$, по стабилизатору протекает ток $I'_{CT MAX}$. Поэтому первая точка графика (т. I) будет иметь координаты $U_{BX MIN}$ и $I'_{CT MIN}$ (190 В и 15,71 мА), вторая (т. J) — $U_{BX MAX}$ и $I'_{CT MAX}$ (250 В и 81,65 мА). Соединив т. I и т. J, получим график $I'_{CT} = f(U_{BX})$ (линия 3 на рисунке 2.3).

2.2.9.4 Область между графиком $I'_{CT} = f(U_{BX})$ и ВАХ S последовательно включенных КС (четырёхугольник $IGHJ$ на рисунке 2.3) является областью падения напряжения на ограничительном резисторе R_O . При $U_{BX} = U_{BX MIN}$ (190 В) падение напряжения на R_O численно равно проекции отрезка IG на ось напряжений (78 В), а при $U_{BX} = U_{BX MAX}$ (250 В) — проекции отрезка JH (138 В). Таким образом, колебания входного напряжения (от 190 до 250 В) компенсируются падением напряжения на ограничительном резисторе (от 78 до 138 В), а к стабилитронам прикладывается неизменное напряжение (112 В).

2.2.9.5 Так как падение напряжения на добавочном резисторе R_D не зависит от величины входного напряжения и определяется только током нагрузки $I_H = \text{const} = 70$ мА и величиной сопротивления $R_D = \text{const} = 0,3$ кОм, то проведем прямую KL справа от ВАХ двух последовательно включенных КС (линия 2) на расстоянии U_D (21 В) (линия 4 на рисунке 2.3). Область между ВАХ двух последовательно включенных КС и прямой KL (прямоугольник $GKLN$ на рисунке 2.3) будет являться областью падения напряжения на добавочном резисторе R_D . Благодаря падению напряжения на R_D (21 В) к нагрузке будет прикладываться неизменное заданное напряжение (91 В).

2.2.9.6 Покажем на рисунке 2.3 и укажем численные значения величин U_{CT} , $S \cdot U_{CT}$, $U_{BX MIN}$, $U_{BX CP}$, $U_{BX MAX}$, $U_{RO MIN}$, $U_{RO CP}$, $U_{RO MAX}$, $I_{CT MIN}$, $I_{CT MAX}$, $I'_{CT MIN}$, $I'_{CT CP}$, $I'_{CT MAX}$, U_H .

2.2.10 Описание работы схемы

Опишем работу схемы (рисунок 2.2), используя таблицу 2.5 и рисунок 2.3.

Когда входное напряжение $U_{BX} = U_{BX CP} = 220$ В, каждый из последовательно включенных КС работает в т. P (линия 1 на рисунке 2.3). По ним протекает ток $I'_{CT CP} = 48,68$ мА. Этот ток, складываясь с током, протекающим по нагрузке $I_H = 70$ мА (рисунок 2.2), создает на ограничительном резисторе R_O падение напряжения $U_{RO CP} = 108$ В. К двум КС прикладывается разность напряжений $U_{BX CP} - U_{RO CP} = 220 - 108 = 112$ В. Далее, протекая по добавочному резистору R_D , ток нагрузки I_H создает дополнительное падение напряжения $U_D = 21$ В, и к нагрузке прикладывается заданное напряжение $U_H = 112 - 21 = 91$ В.

При снижении входного напряжения до $U_{BX} = U_{BX MIN} = 190$ В, напряжение на КС также несколько уменьшается. Рабочая точка каждого из стабилитронов перемещается в т. M (линия 1 на рисунке 2.3). Это приводит к резкому (более чем в 3 раза) снижению тока через каждый из последовательно включенных КС ($I'_{CT MIN} = 15,71$ мА). Этот ток, складываясь с током, протекающим по нагрузке $I_H = 70$ мА (рисунок 2.2), создает на ограничительном резисторе R_O

падение напряжения $U_{RO\text{ CP}} = 78$ В. К двум КС прикладывается разность напряжений $U_{BX\text{ MIN}} - U_{RO\text{ MIN}} = 190 - 78 = 112$ В. Далее, протекая по добавочному резистору $R_{\text{Д}}$, ток нагрузки $I_{\text{Н}}$ создает дополнительное падение напряжения $U_{\text{Д}} = 21$ В, и к нагрузке прикладывается заданное напряжение $U_{\text{Н}} = 112 - 21 = 91$ В.

При возрастании входного напряжения до $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ MAX}} = 250$ В, напряжение на КС также несколько увеличивается. Рабочая точка каждого из стабилитронов перемещается в т. N (линия 1 на рисунке 2.3). Это приводит к резкому (более чем в 5 раз по сравнению с предыдущим режимом) росту тока через каждый из последовательно включенных КС ($I'_{\text{СТ MAX}} = 81,65$ мА). Этот ток, складываясь с током нагрузки $I_{\text{Н}} = 70$ мА (рисунок 2.2), создает на $R_{\text{О}}$ падение напряжения $U_{\text{RO MAX}} = 138$ В. К двум КС прикладывается разность напряжений $U_{\text{ВХ MAX}} - U_{\text{RO MAX}} = 250 - 138 = 112$ В. Далее, протекая по добавочному резистору $R_{\text{Д}}$, ток нагрузки $I_{\text{Н}}$ создает дополнительное падение напряжения $U_{\text{Д}} = 21$ В, и к нагрузке прикладывается заданное напряжение $U_{\text{Н}} = 112 - 21 = 91$ В.

Таким образом, при изменении входного напряжения в пределах от 190 до 250 В на нагрузке напряжение поддерживается постоянным и практически равным заданному значению

$$U_{\text{Н}} \approx 90 \text{ В.}$$

2.3 Оформление результатов расчетов

Отчет по решению данной задачи минимально должен состоять из следующих разделов, которые необходимо располагать на отдельных страницах.

1. Титульный лист.
2. Исходные данные: таблица 1 (аналогичная таблице 2.2).
3. Результаты расчета: таблица 2 (аналогичная таблице 2.4) и таблица 3 (аналогичная таблице 2.5).
4. Рисунок 1 — Расчетная схема стабилизации напряжения (аналогичный рисунку 2.2).
5. Рисунок 2 — Графическая иллюстрация работы схемы стабилизации (аналогичный рисунку 2.3).
6. Описание работы схемы (аналогично п. 2.2.10).
7. Выводы и предложения.