

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ТОКА***Л. Каминир*

## ВВЕДЕНИЕ

Решение многих задач экспериментальной физики связано с необходимостью поддержания силы тока в данной электрической цепи с большой степенью точности. Так как напряжение источника и сопротивление цепи не являются строго постоянными, то для обеспечения неизменного значения тока применяют принудительную стабилизацию. Устройства, служащие для этой цели, называются стабилизаторами тока.

Необходимость в стабилизации тока возникает при питании электромагнитов масс-спектрометров, некоторых видов ускорителей заряженных частиц, магнетронных генераторов, различных электронно-оптических систем, в работах по изучению ядерного парамагнитного резонанса, фотометрированию световых потоков ламп накаливания, в калориметрии, а также во многих других случаях.

Требования к постоянству тока бывают очень велики. Так, например, отклонение тока от заданной величины в обмотках электромагнитных линз электронных микроскопов не должно превышать тысячных долей процента. С той же, а иногда и большей точностью, необходимо поддерживать ток в обмотках лабораторных масс-спектрометров и т. д.

Обычно необходимо менять значение стабилизуемого тока в некоторых пределах. Пределы изменения могут быть довольно велики и достигать в отдельных случаях десятков раз.

Существует несколько разновидностей стабилизаторов тока. К ним относятся стабилизаторы с движущимися частями (механические авторегуляторы сопротивления), феррорезонансные стабилизаторы, параметрические неэлектронные стабилизаторы (барретоны), стабилизаторы с электронными лампами (электронные стабилизаторы) и др.

Благодаря ряду ценных преимуществ: малой инерционности, возможности получения высоких коэффициентов стабилизации и больших пределов регулирования и т. п., электронные стабилизаторы получили широкое распространение. Они применяются для стабилизации как очень малых токов порядка миллиампер и даже микроампер, так и больших токов в единицы и десятки ампер.

В схемах стабилизации токов порядка сотен ампер регулировка обычно не осуществляется непосредственно электронными лампами, а производится изменением тока в цепи возбуждения динамомашины, либо с помощью магнитных усилителей, стоящих на входе выпрямителей, и т. д. Такие стабилизаторы не являются чисто электронными. Однако значительное число их элементов ничем не отличается от элементов электронных стабилизаторов тока с усилителем обратной связи и они кратко упоминаются в § 3 настоящего обзора.

В § 4 в общих чертах рассмотрены стабилизаторы магнитного поля, также имеющие много общего со стабилизаторами тока.

## § 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

При нормальной работе стабилизатора тока изменение сопротивления нагрузки, в пределах заданной точности, не должно влиять на величину тока. Тогда при изменении сопротивления нагрузки  $Z_n$  выходное напряжение меняется пропорционально ему и зависимость  $I = f(U_{вх}, Z_n)$  для стабилизатора тока можно записать как  $I = f(U_{вх}, U_{вых})$ . Считая эту зависимость в области стабилизации линейной, её можно представить выражением<sup>1</sup>

$$I = a + SU_{вх} - gU_{вых}. \quad (1)$$

Здесь  $I$  — ток выхода стабилизатора (ток нагрузки),  $U_{вх}$  — входное напряжение стабилизатора,  $U_{вых}$  — выходное напряжение стабилизатора (напряжение на его нагрузке).

Физический смысл постоянных уравнения (1) определяется, если взять полный дифференциал выражения для тока:

$$dI = \frac{\partial I}{\partial U_{вх}} dU_{вх} + \frac{\partial I}{\partial U_{вых}} dU_{вых}. \quad (2)$$

Постоянная  $S = \frac{\partial I}{\partial U_{вх}}$  характеризует изменение тока в зависимости от входного напряжения и называется крутизной стабилизации. Вторая постоянная  $g = -\frac{\partial I}{\partial U_{вых}}$  характеризует изменение тока в зависимости от выходного напряжения и носит название выходной проводимости. Знак минус указывает на то, что увеличению  $U_{вых}$  соответствует уменьшение тока  $I$ .

Очевидно, что  $S$  и  $g$  идеального стабилизатора равны нулю. В реальном стабилизаторе их стремятся сделать возможно меньшими.

Разделив обе части (2) на номинальное значение тока  $I_0$

$$\frac{dI}{I_0} = \frac{\frac{\partial I}{\partial U_{\text{вх}}} dU_{\text{вх}}}{I_0} + \frac{\frac{\partial I}{\partial U_{\text{вых}}} dU_{\text{вых}}}{I_0} \quad (3)$$

и введя понятие неустойчивости тока  $\sigma = \frac{\Delta I}{I_0}$ , в соответствии с (3) получим:

$$\sigma = \sigma_U + \sigma_R. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma$  — общая неустойчивость тока,  $\Delta I$  — максимальное отклонение от номинальной величины тока  $I_0$ , а  $\sigma_U$  и  $\sigma_R$  — частные неустойчивости, соответственно отражающие степень влияния на постоянство тока изменений напряжения источника и сопротивления нагрузки:

$$\sigma_U = \left| \frac{\Delta I}{I_0} \right|_{R = \text{const}}, \quad (4a)$$

$$\sigma_R = \left| \frac{\Delta I}{I_0} \right|_{U = \text{const}}. \quad (4b)$$

Для характеристики работы схем стабилизации пользуются также понятием коэффициента стабилизации, показывающим отношение неустойчивости напряжения на входе стабилизатора или неустойчивости величины сопротивления к неустойчивости тока в нагрузке стабилизатора.

Аналогично (4a) и (4b) вводят представление о частных коэффициентах стабилизации. Частный коэффициент стабилизации по напряжению  $m_U$  характеризует уменьшение неустойчивости тока на выходе стабилизатора при неизменном сопротивлении, но меняющемся входном напряжении; частный коэффициент по нагрузке  $m_R$  показывает уменьшение неустойчивости тока при изменении нагрузки и постоянном входном напряжении по сравнению с тем изменением тока, которое имело бы место, если бы стабилизатор отсутствовал:

$$m_U = \left| \frac{\sigma_{U_{\text{вх}}}}{\sigma_{U_{\text{вых}}}} \right|_{R = \text{const}}, \quad (5a)$$

$$m_R = \left| \frac{\sigma'_R}{\sigma_R} \right|_{U = \text{const}}, \quad (5b)$$

где

$$\sigma_{U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{0_{\text{вх}}}}; \quad \sigma_{U_{\text{вых}}} = \frac{\Delta I}{I_0}; \quad \sigma'_R = \frac{\Delta R}{R_0}.$$

Величина необходимого коэффициента стабилизации зависит от имеющих место неустойчивостей и от требований к постоянству тока нагрузки.

Ниже приведены формулы<sup>1</sup>, позволяющие при известных параметрах стабилизатора  $S$  и  $g$  и заданных пределах изменения напряжения и сопротивления нагрузки определить нестабильность тока на выходе стабилизатора и коэффициент стабилизации:

$$\Delta I = \frac{S \Delta E_{\text{ист}}}{g \left( Z_{\text{н}} + \frac{1 + S Z_{\text{ист}}}{g} \right)}, \quad (6)$$

$$\Delta I = - I_0 \Delta R_{\text{н}} \frac{1}{(1 + S Z_{\text{н}}) \frac{1}{g} + R_{\text{н}} + \Delta R_{\text{н}}}. \quad (7)$$

Здесь  $\Delta E_{\text{ист}}$  — изменение э. д. с. источника питания по сравнению с номинальной величиной,  $Z_{\text{ист}}$  — внутреннее сопротивление источника питания,  $Z_{\text{н}}$  — полное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н}}$  — номинальное сопротивление нагрузки постоянному току, а  $\Delta R_{\text{н}}$  — её изменение.

Формула (6) позволяет определить изменение тока в зависимости от изменения напряжения, а формула (7) — от изменения нагрузки. Оба выражения указывают на то, что величина нестабильности выходного тока, определяемая полным значением внутренних сопротивлений источника и нагрузки, является функцией частоты.

Изменение сопротивления нагрузки обычно связано с влиянием температуры и происходит сравнительно медленно. Что касается напряжения, питающего стабилизатор, то наряду с медленным его изменением, вследствие, например, дрейфа силовой сети, имеется ряд факторов, вызывающих его быстрые изменения. К ним относятся флуктуации напряжения, связанные с изменениями частоты сети, пульсации на выходе выпрямителя или генератора постоянного тока и т. д. При малой величине допустимой нестабильности необходимо считаться не только с наличием пульсации, но в отдельных случаях также с влиянием довольно высоких гармоник этих пульсаций<sup>2,32</sup>.

В том случае, когда играют роль только медленные изменения входного напряжения,  $Z_{\text{н}}$  представляет собой внутреннее сопротивление выпрямителя постоянному току и определяется наклоном его вольт-амперной характеристики. Если используется нестабилизированный выпрямитель, то внутреннее сопротивление источника  $Z_{\text{ист}}$  определяется сопротивлением конденсатора фильтра на частоте пульсаций.

Формула (6) указывает, что при высоких требованиях к постоянству тока целесообразно применять предварительную стабилизацию питающего напряжения, что на практике осуществляется довольно часто<sup>4,15</sup>. Предварительная стабилизация напряжения целесообразна при стабилизации токов больших магнитов или других цепей с большой постоянной времени также по другим причинам<sup>4</sup>. В схемах стабилизации с применением усилителя отрицательной обратной связи, которые будут рассмотрены ниже, большая постоянная времени нагрузки затрудняет из-за опасности самовозбуждения системы

применение усилителя с большим коэффициентом усиления и, следовательно, препятствует получению больших коэффициентов стабилизации. В том же случае, когда напряжение сети стабилизировано, от усилителя, используемого в схеме стабилизатора тока, требуется значительно меньший коэффициент усиления.

Значительную роль играет отрезок времени, в течение которого необходимо обеспечить заданное постоянство тока. При длительной непрерывной работе стабилизатора заметно сказывается изменение параметров (дрейф) отдельных элементов самой схемы стабилизации (анодного тока электронных ламп, эталонного напряжения и др.), влияние температуры на сопротивление нагрузки и т. п. В тех случаях, когда ток нагрузки невелик, для уменьшения его зависимости от температуры последовательно с нагрузкой иногда включают балластное сопротивление с малым температурным коэффициентом.

При необходимости обеспечить постоянство тока с высокой точностью в течение многих часов работы прибегают к двухзвенной схеме стабилизации<sup>2,5 30</sup>: первое звено снижает влияние быстрых возмущений на величину тока, второе — медленных.

Применяемые схемы стабилизаторов можно классифицировать по величине стабилизуемого тока (малых токов — до одного ампера и больших токов — свыше одного ампера), по точности поддержания постоянства тока (технической точности —  $\sigma > 0,1\%$ , прецизионной точности —  $\sigma < 0,1\%$ ), по времени, в течение которого обеспечивается постоянство тока (схемы кратковременной стабильности —  $t < 1$  часа, схемы длительной стабильности —  $t > 1$  часа) и принципу построения (схемы параметрической стабилизации и схемы с применением усилителя отрицательной обратной связи).

При работе с малыми токами обычно используются параметрические стабилизаторы. Что касается стабилизаторов с усилителем обратной связи, то они применяются для стабилизации как малых, так и больших токов.

Приведенная классификация, естественно, носит условный характер.

## § 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

Схема параметрического стабилизатора тока содержит одно или несколько нелинейных сопротивлений, которые при изменении внешних условий меняют свои параметры таким образом, чтобы ток, текущий через нагрузку, оставался неизменным.

Параметрические стабилизаторы делятся на простые и с авторегулированием. Первые могут обеспечить небольшую точность поддержания тока, вторые, в зависимости от выбранной схемы, — как техническую, так и прецизионную.

Простые параметрические стабилизаторы. Простой параметрический стабилизатор тока представляет собой двух-

Полюсник с нелинейной зависимостью  $I = f(U)$ . Из неэлектронных приборов нужным видом этой характеристики обладают барреты, получившие широкое распространение<sup>6</sup>. Однако их применение ограничено рядом существенных недостатков: возможностью стабилизировать только определённые фиксированные значения тока; тепловой инерцией, вследствие которой при быстрых возмущениях отсутствует стабилизация; зависимостью рабочего тока от температуры окружающей среды.

Электронные параметрические стабилизаторы тока не обладают указанными недостатками, но по сравнению с барретами более сложны и требуют дополнительных источников питания.

В схемах простых параметрических стабилизаторов тока<sup>6</sup> для работы используется пологий участок зависимости анодного тока от анодного напряжения, имеющийся у диодов в области насыщения, а у тетродов и пентодов при выходном напряжении, превышающем некоторую величину. Величина рабочего тока у диодов регулируется напряжением накала, а у тетродов и пентодов — напряжением управляющей или экранной сетки.

В качестве диодных стабилизаторов целесообразно использовать лампы с вольфрамовым катодом, обладающие хорошо выраженной областью насыщения и допускающие изменения накала в широких пределах. При использовании тетродов и пентодов выгодно увеличивать экранное напряжение, так как при этом уменьшаются  $S$  и  $g$  стабилизирующей цепи. Точность, обеспечиваемая простым параметрическим стабилизатором тока, невелика и зависит от режима и типа лампы.

Так, например, для диодного стабилизатора на лампе 4Ц1М при напряжении накала, равном 4 вольтам, и изменении анодного напря-

жения от 100 до 250 вольт анодный ток меняется на величину тока 0,6 мА при среднем токе около 9 мА. При этом коэффициент стабилизации  $m \approx 12,5$ . Коэффициент стабилизации при применении тетродов и пентодов — того же порядка.

Параметрические стабилизаторы с авторегулированием. Работа пентодного или тетродного стабилизатора может быть значительно улучшена введением в катодную цепь лампы сопротивления отрицательной обратной связи<sup>1, 6, 7, 8, 15</sup>. Подобная схема приведена на рис. 1.

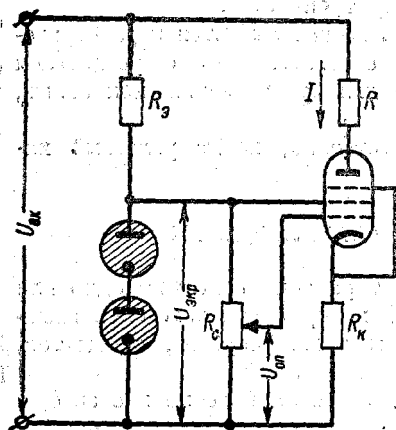


Рис. 1.

Правильное расположение рабочей точки на характеристике  $I_a = f(U_g)$  обеспечивается соответствующим выбором величины опор-

ного напряжения  $U_{оп}$ , компенсирующего падение напряжения на сопротивлении  $R_k$ . Наличие  $U_{оп}$  позволяет использовать большое сопротивление  $R_k$  и, таким образом, получить большую величину сигнала, воздействующего на сетку регулирующей лампы. Необходимое значение рабочего тока устанавливается с помощью потенциометра  $R_c$ .

Крутизна стабилизации и выходная проводимость этой схемы могут быть определены из соотношения

$$S = g = \frac{1}{R_i + (\mu + 1) R_k} \cdot (8)$$

В схеме рис. 1 можно использовать также триод, но, естественно, он даёт худший результат, чем тетрод и пентод, так как у триода значительно меньше  $\mu$  и  $R_i$ .

Более высокий коэффициент стабилизации обеспечивает так называемая «каскадная» схема стабилизации<sup>8</sup>, изображённая на рис. 2. Она является дальнейшим развитием схемы рис. 1. Нижний пентод здесь служит катодной нагрузкой первой лампы. При применении одинаковых ламп нестабильность этой схемы по напряжению определяется из уравнения (9), а по нагрузке — из уравнения (10):

$$(\Delta I)_{R=\text{const}} = \frac{R}{R + (2 + \mu) R_i + (1 + \mu)^2 R_k} \cdot \frac{U_{вх}}{U_{вых}} \cdot \sigma_{U_{вх}}, \quad (9)$$

$$(\Delta I)_{U_{вх}=\text{const}} = \left( \frac{R}{R + (2 + \mu) R_i + (1 + \mu)^2 R_k} \right)^2 \cdot \frac{U_{вх}}{U_{вых}} \cdot \sigma'_R, \quad (10)$$

где  $\sigma_{U_{вх}} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{0 \text{ вх}}}$  — нестабильность входного напряжения и

$\sigma'_R = \frac{\Delta R}{R_0}$  — нестабильность нагрузки.

В схемах рис. 1 и 2 для увеличения коэффициента стабилизации сопротивление  $R_k$  можно осуществить в виде лампы накаливания или другого нелинейного сопротивления, падение напряжения на котором растёт быстрее, чем величина идущего через него тока. Однако благодаря тепловой инерции сопротивления этот способ имеет преимущество лишь при медленных изменениях напряжений и нагрузки.

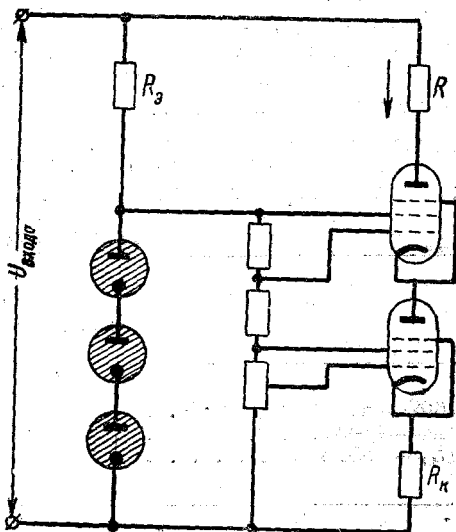


Рис. 2.

Общим недостатком обеих приведённых схем является то, что через сопротивление обратной связи  $R_k$  протекает не только анодный ток лампы, но и ток экранных сеток. Если он нестабилен, то его изменение вызывает изменение напряжения на сопротивлении  $R_k$  и, вследствие этого, изменение напряжения на сетке регулирующей лампы, т. е. в конечном счёте изменение тока нагрузки. Поэтому важно обеспечить стабильность экранного напряжения и такой режим ламп, при котором ток экранной сетки был бы относительно невелик. Приведённые формулы не учитывают влияния изменения экранного тока.

Возможности схем рис. 1 и 2 иллюстрирует таблица 1 для величины стабилизуемого тока 15 мА и сопротивления нагрузки 3 ком.

Таблица 1

| Схема                                                                                                                                                                               | $\sigma_U = \frac{\Delta I}{I_0}$<br>при $\Delta U_{ВХ} = \sigma_{U_{ВХ}} \cdot U_{ВХ}$ | $\sigma_{R_H} = \frac{\Delta I}{I_0}$<br>при $\Delta R_H = \sigma'_R \cdot R_H$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 6Ф6 в триодном режиме . . .<br>$R_k$ — 3-ваттная лампочка . . .<br>$U_{ВХ}$ — 550 в . . . . .                                                                                       | 0,9 $\sigma_{U_{ВХ}}$                                                                   | —0,06 $\sigma'_R$                                                               |
| 6Ф6 в триодном режиме . . .<br>$R_k$ — 6-ваттная лампочка . . .<br>$U_{ВХ}$ — 245 в . . . . .                                                                                       | 0,93 $\sigma_{U_{ВХ}}$                                                                  | —0,16 $\sigma'_R$                                                               |
| 6Ф6 в пентодном режиме . . .<br>$R_k$ — 3-ваттная лампочка . . .<br>$U_{ВХ}$ — 270 в . . . . .<br>$U_{СМ}$ — 258 в . . . . .<br>$U_{ЭКР}$ — 250 в (две лампы типа СГ4С) . . . . .   | 0,023 $\sigma_{U_{ВХ}}$                                                                 | —6 · 10 <sup>-5</sup> $\sigma'_R$                                               |
| Две 6Ф6 в каскадной схеме . .<br>$R_k$ — 3-ваттная лампочка . . .<br>$U_{ВХ}$ — 580 в . . . . .<br>$U_{СМ}$ — 17,5 в . . . . .<br>$U_{ВКР}$ — 220 в (три лампы типа СГ4С) . . . . . | 1,87 · 10 <sup>-4</sup> $\sigma_{U_{ВХ}}$                                               | —2,86 · 10 <sup>-9</sup> $\sigma'_R$                                            |

В заключение рассмотрения параметрических стабилизаторов остановимся на  $\mu$ -схеме стабилизации тока<sup>1, 7, 9</sup>. Название её связано с тем, что первоначально она была разработана для измере-

ния параметров ламп и лишь впоследствии применена для целей стабилизации. Принципиальный вид  $\mu$ -схемы стабилизации приведен на рис. 3, а. Напряжение, прилагаемое к сетке регулирующей лампы, в  $\mu$  раз меньше, чем напряжение, прилагаемое к аноду

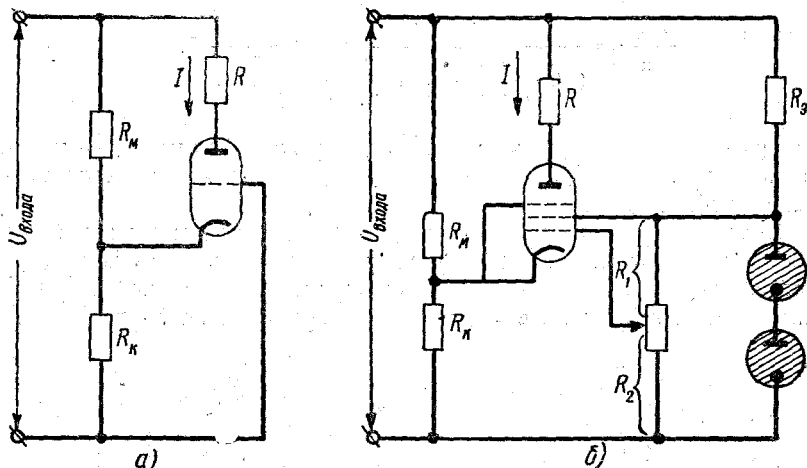


Рис. 3.

( $\mu$  — коэффициент усиления лампы). Для этого должно выполняться соотношение

$$R_{\mu} = \mu R_K. \quad (11)$$

При этом изменения анодного тока, вызываемые изменением напряжения  $U_{вх}$ , будут такими же по величине, как и за счёт сеточного напряжения, но направленными в другую сторону, т. е. ток в нагрузке  $I$  меняться не будет. Крутизна стабилизации этой схемы

$$S = \frac{1 - (\mu + 1) \frac{R_K}{R_{\mu} + R_K}}{R_L + (\mu + 1) \frac{R_{\mu} \cdot R_K}{R_{\mu} + R_K}}. \quad (12)$$

Очевидно, что при выполнении условия (11) числитель обращается в нуль, т. е.  $S = 0$ , имеет место полная компенсация. Так как величина  $\mu$  у лампы не является строго постоянной, а зависит от рабочей точки на её характеристике, то условие (12) обычно не выполняется для всех значений тока внутри требуемого диапазона его регулирования и в широких пределах изменения входного напряжения.

Реакция схемы на изменение сопротивления нагрузки — такая же, как и схемы рис. 1.

На рис. 3, б. приведён вариант  $\mu$ -схемы, выполненной на пентоде, дающем значительно лучший результат, чем триод. Соотношение между  $R_\mu$  и  $R_k$  с учётом влияния экранной сетки <sup>7</sup> и сопротивления газовых стабилизаторов <sup>7</sup> определяется формулой

$$\frac{R_\mu}{R_k} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 + \frac{R_g}{R + R_g} \left[ \frac{\mu_1 R_2}{R_1 + R_2} + \mu_2 \right]} - 1, \quad (13)$$

где  $\mu_1$  — коэффициент усиления по сигнальной сетке,  $\mu_2$  — коэффициент усиления по экранной сетке,  $R_g$  — динамическое сопротивление стабиловольта.

Компенсация влияния изменений входного напряжения в более широких пределах, чем это удаётся достигнуть в  $\mu$ -схеме, осуществляется в схеме  $\mu$ -моста с отрицательной обратной связью <sup>1</sup> (рис., 4, а). Любые изменения падения напряжения на лампе поворачи-

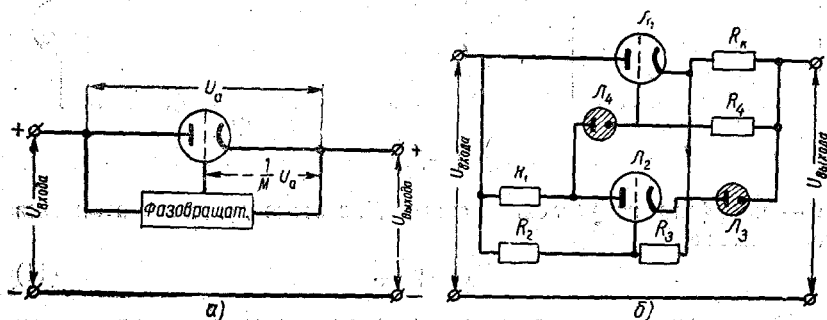


Рис. 4.

ваются фазовращающим элементом на  $180^\circ$ , причём определённая доля этого напряжения поступает на сетку. Если эта доля равна  $\frac{1}{\mu}$ , то, как и в предыдущем случае, анодный ток лампы остаётся неизменным. Роль фазовращателя выполняет лампа, обеспечивающая одновременное усиление сигнала (рис. 4, б). Анализ её работы даёт следующее соотношение для выбора делителя напряжения:

$$\frac{R_2}{R_3} \approx \frac{\mu_1 \mu_2 R_1}{(1 + \mu_1) [\mu_2 (R_k + R_c) + R_1]} - 1. \quad (14)$$

Подобная схема при токе 50 ма и сопротивлении нагрузки 3000 ом обеспечила полную стабилизацию в двух точках диапазона и значение  $S = g$  не хуже  $0,25 \cdot 10^{-6}$  мо в промежутке между этими точками.

Несмотря на принципиальную возможность получения идеальной стабилизации по отношению к изменению входного напряжения,

приведённые схемы не получили широкого распространения. Постоянство компенсации, как уже указывалось, зависит от стабильности характеристик ламп и сопротивлений. Их изменения во времени либо при перестройке внутри диапазона приводят к нарушению компенсации.

### § 3. СТАБИЛИЗАТОРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСИЛИТЕЛЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

#### Основные соотношения

Наибольшее распространение получили электронные стабилизаторы тока с применением усилителя отрицательной обратной связи (с глубокой противосвязью) <sup>2, 3, 4, 5, 6, 10, 11</sup>. Это объясняется рядом их ценных качеств: малой зависимостью входного тока от изменения параметров ламп, используемых в схемах стабилизатора; возможностью стабилизировать как малые, так и большие токи при широком диапазоне их регулирования; значительной свободой в выборе элементов схемы и, наконец, возможностью получения высоких коэффициентов стабилизации.

На рис. 5, а приведена блок-схема стабилизатора тока с глубокой противосвязью. Он состоит из 4 основных элементов: регулирующего элемента, опорного (эталонного) сопротивления, опорного

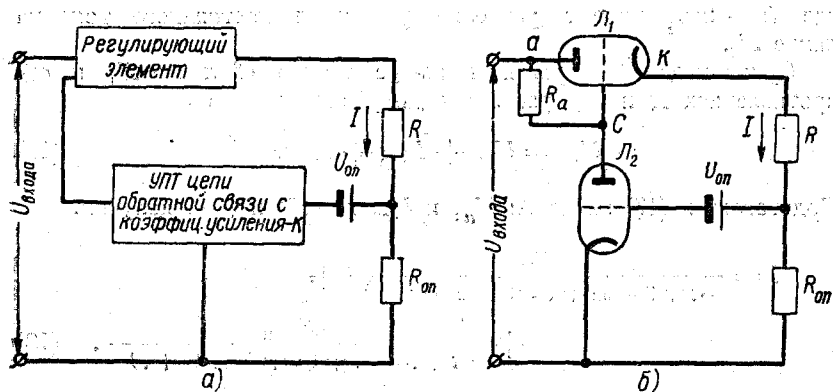


Рис. 5. Стабилизаторы тока с глубокой противосвязью

(эталонного) напряжения и усилителя постоянного тока в цепи отрицательной обратной связи.

Текущий через опорное сопротивление выходной ток создаёт на нём падение напряжения  $IR_{оп}$ . Навстречу ему включено опорное напряжение  $U_{оп}$ . Изменение разности этих двух напряжений, возникающее при отклонении тока от номинального значения,

представляет собой сигнал, поступающий на вход усилителя постоянного тока. После усиления этот сигнал воздействует на регулирующий элемент так, что обеспечивает постоянство тока в нагрузке с заданной точностью.

Простейший стабилизатор, соответствующий блок-схеме рис. 5, а, содержит две лампы: регулирующую ( $L_1$ ) и лампу усиления постоянного тока ( $L_2$ ) — рис. 5, б. Подобная схема на двух лампах используется, в частности, для питания масс-спектрографа<sup>10</sup>.

На примере схемы рис. 5, б рассмотрим основные соотношения для электронного стабилизатора тока с усилителем отрицательной обратной связи<sup>11</sup>. Падение напряжения на регулирующей лампе:

$$U_{ак} = IR_i - \mu U_{ек}, \quad (15)$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление регулирующей лампы без учёта действия обратной связи, а  $\mu$  — её коэффициент усиления. Знак перед вторым слагаемым учитывает сдвиг на  $180^\circ$  между фазами сеточного и анодного напряжений.

Напряжение на управляющей сетке регулирующей лампы (без учёта постоянной составляющей, зависящей от режима работы лампы  $L_2$ ) равно

$$U_{ек} = -k(IR_{оп} - U_{оп}) - I(R + R_{оп}), \quad (16)$$

где  $k$  — коэффициент усиления усилителя постоянного тока на лампе  $L_2$ .

Сумма падений напряжения на регулирующей лампе  $L_1$  и сопротивлениях  $R$  и  $R_{оп}$  равна входному напряжению

$$U_{вх} = U_{ак} + I(R + R_{оп}). \quad (17)$$

Подставляя в (17) значения  $U_{ак}$  и  $U_{ек}$  из (15) и (16), получим:

$$I = \frac{U_{вх}}{R_i + \mu k R_{оп} + (R + R_{оп})(1 + \mu)} + \frac{\mu k U_{оп}}{R_i + \mu k R_{оп} + (R + R_{оп})(1 + \mu)}. \quad (18)$$

Отсюда крутизна стабилизации:

$$S = \frac{\partial I}{\partial U_{вх}} = \frac{1}{R_i + \mu k R_{оп} + (R + R_{оп})(1 + \mu)}, \quad (19)$$

а входная проводимость

$$g = \frac{\partial I}{\partial R_{оп}} = \frac{1 + \mu}{R_i + \mu k R_{оп} + (R + R_{оп})(1 + \mu)}. \quad (20)$$

Обычно  $k \gg 1$ . Тогда

$$S \approx \frac{1}{\mu k R_{\text{оп}}}, \quad (19a)$$

и

$$g \approx \frac{1}{k R_{\text{оп}}}. \quad (20a)$$

Таким образом, ток стабилизатора меняется примерно в  $\mu k R_{\text{оп}}$  раз меньше, чем напряжение на его входе, и в  $k R_{\text{оп}}$  раз меньше изменения нагрузки.

Влияние изменения параметров регулирующей и усилительной ламп на работу схемы стабилизации мало и тем меньше, чем больше коэффициент усиления усилителя  $k$ . Аналогично влияние изменений параметров лампы тем меньше, чем больше их величина; так, например:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \mu} \right| = \left| \frac{k R_{\text{оп}}}{(\mu k R_{\text{оп}})^2} \right| \ll 1.$$

К сожалению, это, однако, не относится ко всем элементам схемы стабилизатора. При  $k \gg 1$  из (19) получим:

$$I \approx \frac{\mu k U_{\text{оп}}}{1 + \mu k R_{\text{оп}}} \approx \frac{U_{\text{оп}}}{R_{\text{оп}}}; \quad (21)$$

таким образом, изменения опорных напряжения и сопротивления приводят к пропорциональному изменению стабилизуемого тока. Другими словами, нестабильность схемы ограничивается нестабильностью её опорных элементов.

Выбор конкретных элементов схемы стабилизатора осуществляется в зависимости от величины стабилизуемого тока, падения напряжения на нагрузке, допустимой нестабильности, времени, в течение которого требуется сохранить номинальное значение тока, и других причин.

Ниже более подробно рассмотрены основные элементы схем стабилизаторов тока.

### Элементы схем стабилизаторов

**Регулирующий элемент.** Регулирующим элементом обычно служит одна или несколько параллельно соединённых электронных ламп (до нескольких десятков). Они включаются либо последовательно с источником тока (рис. 6, а), либо параллельно ему (рис. 6, б). В схеме рис. 6, а при уменьшении тока в цепи сопротивление лампы также уменьшается и с заданной точностью восстанавливается номинальное значение тока. При увеличении тока происходит обратное явление.

В схеме рис. 6,б регулирование осуществляется изменением падения напряжения на балластном сопротивлении  $R_{бал}$ . Регулирующая лампа здесь играет роль не переменного сопротивления, как в предыдущем случае, а переменного шунта.

На практике наибольшее распространение получили схемы последовательного регулирования. Схема параллельного регулирования имеет меньший к. п. д. и применяется реже. Её недостатком является также ограниченная возможность выбора режима регулирующей лампы. Она применяется в тех случаях, когда ток, текущий через нагрузку, мал, а падение напряжения на ней достаточно для создания нормального анодного напряжения лампы. На практике может

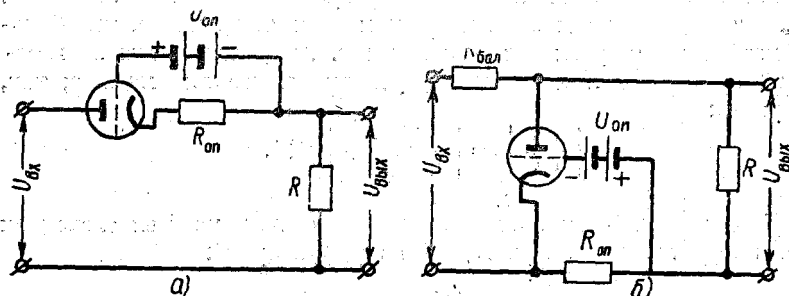


Рис. 6.

оказаться существенным также то, что катод параллельной регулирующей лампы можно присоединять непосредственно к цепи нулевого потенциала.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить регулирование больших токов (порядка единиц или нескольких десятков ампер), применяют схему последовательного регулирования, пропуская через регулирующие лампы не весь ток, а его часть. Остальная часть течёт через сопротивление шунта<sup>41</sup>. Естественно, что изменение тока в нагрузке при этом меньше, чем изменение тока регулирующих ламп.

Следует отметить, что при конструировании электромагнитов тогда, когда это возможно, необходимое число ампервитков стремятся получить за счёт увеличения числа витков и уменьшения тока, так как проблема стабильного питания при высокоомной нагрузке (малом токе) решается проще, чем при низкоомной.

С точки зрения повышения к. п. д. стабилизатора последовательная регулирующая лампа должна пропускать возможно больший ток при наименьшем падении на ней напряжения. При этом мощность рассеяния на аноде не должна превышать допустимую величину. Что же касается стабилизирующего действия схемы, то в соответствии с формулами (19) и (20) оно будет тем больше, чем больше коэффициент усиления лампы  $\mu$  и её внутреннее сопротивление  $R_i$ .

Приведённые требования в известной степени противоречивы, и выбор типа лампы должен осуществляться в зависимости от конкретных обстоятельств. Наиболее часто для целей регулирования тока применяются лампы типов 6Н5С, 6ПЗС, 6П6С, 6П9 и др.

При рабочих токах порядка десятков и сотен ампер приходится отказаться от использования электронных ламп в качестве непосредственного регулирующего элемента. Если питание производится от выпрямителя, то обычно прибегают к регулированию не в цепи постоянного, а в цепи переменного тока, воздействуя на входное напряжение выпрямителя с помощью магнитного усилителя<sup>12, 35</sup> либо используя регулируемый выпрямитель на тиратронах<sup>30, 31</sup>.

Первому способу следует отдать предпочтение, так как он обеспечивает большую эффективность стабилизации. Кроме того, регулируемые выпрямители обладают тем недостатком, что они создают флуктуации, вызываемые работой тиратронов<sup>32</sup>. Применение для их сглаживания LC-фильтров при больших токах связано со значительными практическими трудностями; кроме того, такие фильтры сильно увеличивают постоянную времени выпрямителя.

При больших токах для питания вместо выпрямителей часто используют мотор-генераторные установки. В этом случае регулирование обычно производится воздействием на цепь возбуждения генератора<sup>4, 34, 40</sup>. Однако такой метод не позволяет бороться с флуктуациями тока, вызванными быстрыми возмущениями: гармониками основной частоты вращения генератора, влиянием на его работу изменений частоты питающей сети и др. Для исключения таких влияний была разработана электронная система<sup>2, 32</sup>, позволившая при токе магнита в 160 ампер получить стабильность порядка  $10^{-4}$  % за время работы в течение одной минуты.

### Опорные элементы

Выше указывалось, что нестабильность опорных элементов — сопротивления и напряжения — не компенсируется отрицательной обратной связью и переносится на выход стабилизатора. Таким образом, именно эти элементы в конечном счёте определяют максимальную достижимую стабильность тока. Естественно, что их выбору и режиму работы уделяется большое внимание.

Требования к постоянству сопротивления в стабилизаторах тока выше, чем в стабилизаторах напряжения, так как в последних важно отношение сопротивлений делителя, а в стабилизаторе тока — абсолютная величина сопротивления.

Обычно опорные сопротивления изготавливаются из провода с низким температурным коэффициентом, чаще всего из манганина. В прецизионных схемах применяются сплавы, температурный коэффициент которых до седьмого знака равен нулю<sup>13</sup>. Нестабильность специально прокалённых и отожжённых опорных сопротивлений не

превышает  $10^{-3} \%$  в год. Их герметизация снижает нестабильность примерно ещё на порядок <sup>11</sup>.

Если не требуется обеспечения стабильности в течение длительного времени и ток мал, иногда используют непроволочные сопротивления, причём обеспечивается большой запас по рассеиваемой в них мощности. При стабилизуемом токе в десятки и более ампер задача изготовления стабильного сопротивления сильно усложняется, так как на нём рассеивается значительная мощность. Во многих случаях сопротивление помещается в масляную ванну и температура масла поддерживается с точностью до долей градуса <sup>26</sup>.

Для снижения рассеиваемой опорным сопротивлением мощности иногда приходится заметно уменьшать его величину, что приводит к ослаблению сигнала и вследствие этого может вызвать трудности в изготовлении усилителя постоянного тока. Эти трудности могут быть исключены, если подать сигнал на вход усилителя не непосредственно с сопротивления, а с помощью высокочувствительного дифференциального преобразователя, состоящего из зеркального гальванометра и фотоэлементов. Напряжение на выходе фотоэлементов зависит от положения зайчика от зеркальца гальванометра, включённого в цепь опорного сопротивления <sup>34</sup>. Напряжение, снимаемое с сопротивления, в этой схеме составляет всего 200 милливольт.

Источником опорного напряжения могут служить газоразрядные лампы или химические источники тока (сухие батареи, либо элементы Витстона).

Газоразрядные лампы (стабилитроны) с эксплуатационной точки зрения являются наиболее удобными источниками опорного напряжения. Этим объясняется их широкое применение в стабилизаторах тока <sup>3, 10, 14</sup>. С их помощью можно получить нестабильность тока меньше  $5 \cdot 10^{-3} \%$  в течение одного часа <sup>14</sup> и ещё сократить эту величину для более коротких отрезков времени <sup>3</sup>. Однако при необходимости получения высокого постоянства тока в течение продолжительного времени стабилитроны не могут конкурировать с химическими источниками опорного напряжения. Бенсоном <sup>16</sup> приводится величина нестабильности газоразрядных ламп порядка  $0,4 \%$  на 1000 часов работы. Дрейф отечественных стабилитронов составляет  $0,1 \div 0,2 \%$  от их номинального напряжения <sup>17</sup>.

Напряжение стабилитрона зависит от ряда обстоятельств: величины текущего через него тока, температуры баллона, срока службы, времени работы после включения и др. <sup>16, 17, 18</sup>. Обычно производится индивидуальный отбор стабилитронов, так как для них характерен значительный разброс по параметрам у разных экземпляров ламп одной и той же серии. Желательно также, чтобы ток, текущий через стабилитрон, менялся в возможно меньших пределах.

Сухие батареи могут обеспечить высокое постоянство опорного напряжения в течение длительного времени. Их нестабильность тем

меньше, чем меньше разрядный ток батареи. При малых токах утечки (меньше 1 микроампера) и небольших пределах изменения температуры нестабильность сухих батарей может быть меньше 0,05% в течение ряда месяцев<sup>19</sup>. В тех случаях, когда необходимо обеспечить большую стабильность тока, батарею помещают в термостат. При этом не желательно применение температуры больше 50°С, так как такая температура существенно уменьшает срок службы батареи. Вспомогательный стабилизатор тока, описанный в<sup>19</sup> и работавший с опорной батареей в 90 в, имел нестабильность, в течение многих часов меньшую 0,02%, а в течение нескольких часов — меньшую 0,01%.

Для изменения величины опорного напряжения батарея иногда подключается к потенциометру, что повышает расход тока. В этих случаях батарея предварительно «формуется», т. е. перед работой разряжается номинальным током в течение определённого отрезка времени. Для примера отметим, что при непрерывном разряде током в 1 ма батареи БАС-Г-80 сравнительно пологий участок зависимости напряжения от времени начинается на 12-е сутки. Затем за сутки напряжение снижается на величину около 0,25% от первоначального напряжения разряда. При этом изменение не является плавным. В отдельные отрезки времени наблюдается некоторое повышение напряжения<sup>20</sup>. Разрядный ток опорной батареи должен быть минимальным и его желательно не менять. В тех случаях, когда схема стабилизации должна обеспечить особо высокое постоянство тока в течение длительного времени, используют нормальный элемент Витстона 2-го или 3-го класса.

Изменения э. д. с. элемента Витстона 2-го класса при небольших колебаниях температуры составляют около  $4 \cdot 10^{-3}\%$  на 1°С и элемента Витстона 3-го класса — около  $10^{-3}\%$  на 1°С. Обычно элементы Витстона термостатируются. Если используется несколько последовательно соединённых элементов, то для уменьшения утечки они погружаются в масло.

Недостатком нормальных элементов являются их малая э. д. с. и низкий разрядный ток, который не должен превышать 100 микроампер. Чем он меньше, тем выше стабильность напряжения нормального элемента. Обычно принимаются меры для уменьшения всех возможных утечек, ограничения сеточного тока лампы первого каскада усиления и защиты опорного элемента от случайных повышений расхода тока<sup>5</sup>.

### Усилители постоянного тока

Для усиления сигнала ошибки, пропорционального отклонению тока от номинальной величины, применяются усилители, способные усиливать медленно изменяющиеся напряжения. Эти усилители обычно называются усилителями постоянного тока. Параметры

усилителя постоянного тока (коэффициент усиления, ширина полосы пропускания и др.) в значительной степени определяют параметры схемы стабилизации: коэффициент стабилизации, её быстродействие, величину нестабильности тока в течение заданного интервала времени и др.

Усилителям постоянного тока присущ ряд характерных особенностей. По принципу построения их можно разбить на два класса: усилители с усилением непосредственно по постоянному току (гальванической связью между каскадами) и усилители с преобразованием постоянного тока в переменный. Усилителям постоянного тока посвящено большое число работ. В списке цитированной литературы приводятся лишь наиболее интересные из их числа, известные автору 2, 21, 22, 23, 25, 36.

Если стабилизатор должен обеспечить работу в течение коротких промежутков времени, то изготовление усилителя постоянного тока не вызывает серьезных затруднений. Он конструируется по схеме непосредственного усиления постоянного тока и состоит, в зависимости от требуемого усиления, из одного или двух-трёх каскадов. Для увеличения стабильности по отношению к изменениям входного напряжения на экранную сетку лампы усилительного каскада иногда подают напряжение от резистивного делителя, подключённого к входу стабилизатора<sup>33</sup>.

Помимо большой чувствительности усилителей постоянного тока к колебаниям питающих напряжений, основным недостатком, ограничивающим их применение, является влияние на их работу катодного дрейфа. Последний обусловлен процессами, происходящими в катоде, и заключается в медленном изменении характеристик лампы, имеющем место даже при строгом постоянстве питающих напряжений. Наиболее сильно влияние дрейфа сказывается у ламп первых ступеней, где уровень сигналов мал. Вызванные дрейфом изменения выходного напряжения усилителя нельзя отличить от изменений, вызванных сигналом. Поэтому дрейф приводит к изменению стабилизируемого тока. Существует ряд способов уменьшения влияния дрейфа на работу усилителя<sup>6, 21</sup>. В схеме стабилизатора дрейф сказывается тем меньше, чем больше величина опорного напряжений.

Так как наиболее интенсивно дрейф происходит в первые часы работы ламп, то перед установкой лампы в схему её необходимо тренировать в номинальном режиме не менее 50—60 часов<sup>36</sup>. Однако даже после тщательного отбора ламп одной серии и их тренировки, применения специальных схем уменьшения дрейфа и режимов с пониженным потенциалом электродов ламп трудно добиться дрейфа ниже нескольких милливольт в час. Обычно дрейф составляет 10 и более милливольт в час.

Ввиду того, что изменение режима лампы также эквивалентно появлению ложного сигнала на сетке, анодные и экранные цепи

усилителей постоянного тока обычно питаются от стабилизированных источников питания. В ряде случаев стабилизируются источники питания накальных цепей, в частности накала первых каскадов усилителя. Иногда они через гасящие сопротивления подключаются к источнику стабильного анодного напряжения.

При отсутствии стабилизации напряжения накала нужно считаться с тем, что его изменение на  $\pm 10\%$  эквивалентно ложному сигналу порядка 0,05—0,3 в (в зависимости от схемы). Применение схем самостабилизации снижает ложный сигнал в несколько раз<sup>36</sup>.

Для повышения устойчивости работы усилителей постоянного тока и снижения влияния изменений питающих напряжений в них широко используется отрицательная обратная связь.

Для иллюстрации изложенного укажем, что в стабилизаторе тока масс-спектрометра<sup>14</sup>, содержащем трёхкаскадный усилитель с непосредственным усилением постоянного тока и отрицательной обратной связью, получена нестабильность тока, меньшая  $5 \cdot 10^{-3}\%$  за время работы до одного часа. Усилитель питается от стабилизированного выпрямителя, к выходу которого подключены также накальные цепи нескольких ламп. Изменение сетевого напряжения на  $\pm 10\%$  меняет ток в нагрузке меньше чем на  $1 \cdot 10^{-3}\%$ .

В тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную работу стабилизатора при малой выходной нестабильности, применяют усилители с преобразованием постоянного тока в переменный<sup>21, 23</sup>. Эти усилители свободны от основных недостатков схем непосредственного усиления, но отличаются большей сложностью. Их чувствительность может быть доведена до долей микровольта. Она в основном определяется принципом работы и конструктивным выполнением элемента преобразования.

Применение усилителей с преобразованием постоянного тока в переменный в сочетании с термостатированным элементом Вестона в качестве источника опорного напряжения позволяет получить нестабильность меньше сотых и тысячных долей процента в течение многих часов работы<sup>2, 26, 37, 38</sup> и десяти тысячных — в течение малых отрезков времени<sup>2</sup>.

#### § 4. СТАБИЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Выше указывалось, что стабилизаторы тока часто применяются для обеспечения постоянства поля электромагнитов. Однако даже при идеальной стабилизации тока в обмотке магнита магнитное поле в его зазоре может меняться благодаря изменению геометрических размеров зазора, влиянию внешних полей и т. д. При перестройке магнита вследствие гистерезиса одному и тому же номиналу тока могут соответствовать несколько различающиеся значения магнитных полей. Таким образом, в ряде случаев стабилизация тока не может обеспечить требуемой высокой точности поддержания величины магнитного поля.

Стабилизатор тока с усилителем отрицательной обратной связи может быть превращён в стабилизатор магнитного поля, если в качестве датчика использовать не опорное сопротивление в цепи тока, а какой-либо элемент, связанный непосредственно с магнитным полем. Таким элементом может служить магнетрон<sup>27</sup>, датчик, основанный на явлении ядерного парамагнитного резонанса<sup>28, 39</sup>, вращающаяся катушка<sup>29</sup> и т. д. Другие элементы стабилизатора поля могут остаться без каких-либо принципиальных изменений по сравнению со стабилизатором тока. Регулировка поля, как правило, производится изменением подмагничивающего тока.

Стабилизация магнитного поля, использующая ядерный парамагнитный резонанс, обеспечивает чрезвычайно высокую его стабильность, позволяя поддерживать величину поля в зазоре с точностью до сотых долей гаусса<sup>28</sup>.

Опорное напряжение в некоторых схемах получают с помощью эталонного магнита. Так, например, в работе<sup>29</sup> описан стабилизатор, в котором синхронный мотор вращает две катушки: одну в стабилизуемом поле электромагнита, другую — в поле эталонного постоянного магнита. Э. д. с. обеих катушек выпрямляется контактными преобразователями, сравнивается между собой, и их разность, представляющая сигнал, поступает на вход усилителя постоянного тока.

Детальное рассмотрение стабилизаторов магнитного поля выходит за пределы настоящего обзора. Целью изложенного являлось указать на определённые ограничения в применении стабилизаторов тока для создания постоянных магнитных полей и одновременно подчеркнуть общность ряда элементов стабилизатора тока и стабилизаторов магнитного поля.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. R. Hill, Proc. Inst. Rad. Engrs. **33**, 765 (1945).
2. H. S. Sommers, P. R. Weiss and W. Halpern, Rev. Scient. Instr. **22**, 612 (1951).
3. В. В. Поливанов, Стабилизация электрического питания электронного микроскопа, 1953 г. (кандидатская диссертация).
4. D. Cero, Y. Parry, J. Scient. Instr. **26**, 374 (1949).
5. S. Giordano, G. K. Green and E. I. Rogers, Rev. Scient. Instr. **24**, 848 (1953).
6. А. М. Бонч-Бруевич, Применение электронных ламп в экспериментальной физике. Гос. изд. технико-теоретич. литературы, М., 1954.
7. К. Б. Мазель, Радиотехника **9**, № 5, 36 (1954).
8. I. N. Van Scauc, E. H. Schult, Proc. IRE **32**, 415 (1944).
9. И. Г. Гольдреев, Стабилизаторы напряжения, Госэнергоиздат, 1952.
10. H. E. Duckworth, Rev. Scient. Instr. **21**, 54 (1950).
11. M. W. Jervis, Electronic Engineering **25**, 429 (1954).
12. M. S. Wills, Electronic Engineering **25**, 250 (1953).

13. А. С. Займовский и В. В. Усов, *Металлы и сплавы в электро-технике*, Госэнергоиздат, 1949.
14. R. L. Graham, A. L. Harness and H. G. Thode, *J. Scient. Instr.* **24**, 5, 119 (1947).
15. J. H. Guire, *Electronic Engineering* **27**, 529 (1955).
16. F. A. Benson, *Electronic Engineering* **24**, 456 (1952).
17. Ю. Д. Рогозин, *Труды МЭИ им. В. М. Молотова, Прикладная электроника*, вып. 4, 1949.
18. B. Schumacher, *Frequenz*, **5**, 5 (1951).
19. Детали и элементы радиолокационных станций, ч. II, *Советское радио*, 1952.
20. Г. Г. Морозов, *Принципиальные и эксплуатационные особенности анодных батарей галетной конструкции*, М., 1948.
21. Л. И. Байда и А. А. Семенович, *Электронные усилители постоянного тока*, Госэнергоиздат, 1953.
22. M. Artzt, *Electronics* **8**, 112 (1945).
23. G. Keßler, *Archiv für Technisches Messen* **1**, 204, 19 (1953).
24. G. N. Patchett, *Electronic Engineering* **22**, 424 (1950).
25. K. Kandian, D. E. Brown, *Proc. Instr. Electr. Engin.* **99**, 2, 314 (1952).
26. I. G. Gottigham, W. H. Moore, E. I. Rogers, G. M. Turner, *Rev. Scient. Instr.* **24**, 816 (1953).
27. Nier, *Rev. Scient. Instr.* **6**, 254 (1935).
28. M. E. Packard, *Rev. Scient. Instr.* **19**, 435 (1948).
29. W. T. Van der Walt, *Rev. Scient. Instr.* **24**, 413 (1953).
30. M. M. Novakovic, *Bull. Instr. Nucl. Scien.* **8**, 61 (1953).
31. M. Henderson, M. White, *Rev. Scient. Instr.* **9**, 19 (1938).
32. H. S. Sommers, P. R. Weiss and W. Holpern, *Rev. Scient. Instr.* **20**, 244 (1948).
33. M. E. Haine, *J. Inst. Electr. Eng.* **94**, 1, 447 (1947).
34. W. Y. Chang, *Phys. Rev.* **69**, 60 (1946).
35. М. А. Розенблат, *Радиотехника* **8**, № 2, 51 (1953).
36. *Ламповые усилители*, т. II, *Советское радио*, 1951.
37. E. I. Rogers and G. M. Turnen, *Rev. Scient. Instr.* **24**, 805 (1953).
38. E. I. Rogers, *Electronics* **10**, 151 (1955).
39. В. И. Михайлов и В. М. Морозов, *ЖТФ*, **25**, 9 1649 (1955).
40. S. Rubin, D. C. Sachs, *Rev. Scient. Instr.* **26**, 1029 (1955).
41. R. W. Deichert, *Electronics* **8**, 170 (1955).