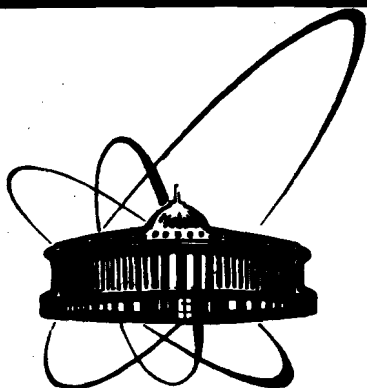


89-547



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

M 643

P10-89-547

В. Ф. Минашкин

**УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

1989

ВВЕДЕНИЕ

При экспериментальном моделировании работы сверхпроводящих магнитов в условиях импульсных энерговыделений наиболее широкое распространение получили два типа экспериментальных образцов. В первом случае используется токопроводящий материал с сопротивлением, мало зависящим от температуры (T)^{1/1}. Температура поверхности определяется с помощью прикрепленных к ней датчиков. Во втором случае материал тепловыделяющей поверхности образца обладает существенно зависящим от T сопротивлением, что может использоваться для одновременного измерения T поверхности. При исследованиях процессов теплопередачи в качестве параметра обычно используется мощность, поэтому требования к устройствам питания нагревателей этих двух типов образцов соответственно будут отличаться друг от друга. В первом варианте постоянство мощности, выделяемой в нагревателе, достигается использованием стандартных устройств питания со стабилизацией тока или напряжения в нагрузке. Во втором варианте, с учетом зависимости сопротивления нагревателя от температуры, постоянство мощности должно обеспечиваться применением устройства питания со стабилизацией мощности в нагрузке.

В данной работе описывается усилитель мощности (УМ), входящий в подсистему питания экспериментального образца^{1/2}, применяемого для исследования нестационарной теплопередачи к нормальному и сверхтекучему гелию при импульсных тепловых нагрузках.

ТРЕБОВАНИЯ К УМ

В зависимости от поставленной задачи экспериментальный образец может содержать от одного до шести гальванически развязанных тепловыделяющих элементов (ТВЭ)^{1/2}. ТВЭ изготовлены в виде тонких пленок из углерода, которые используются в качестве малоинерционных нагревателей. Величина сопротивления ТВЭ характеризует температуру поверхности. В рабочем диапазоне температур сопротивление ТВЭ меняется от 6 до 1 кОм (при росте температуры сопротивление падает), время тепловой реакции менее 100 нс. Диапазон удельной мощности, выде-

ляемой с единицы поверхности ТВЭ, находится в пределах от 100 до 60000 Вт/м² [2]. С учетом размеров тепловыделяющей поверхности нужно, чтобы УМ обеспечивал на нагрузке напряжение до 200 В с максимальной мощностью около 40 Вт. Для проведения большинства экспериментов требуется минимальное значение фронтов импульсов мощности в ТВЭ — не более 20 мкс с длительностью импульсов от 100 мкс до десятков секунд. Нестабильность мощности при изменении сопротивления ТВЭ в процессе нагрева допускается в несколько процентов. Управление УМ и измерение сопротивления ТВЭ должно осуществляться серийно выпускаемыми блоками. Кроме того, в УМ необходимо предусмотреть защиту от перегрузок с соответствующей индикацией.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ УМ

Структурная схема УМ представлена на рис.1. Конструктивно УМ выполнен в механике стандарта КАМАК, что облегчает изготовление и совместимость УМ с применяемой на криогенном стенде [3] аппаратурой в стандарте КАМАК.

УМ состоит из пяти блоков, соединенных шиной, которая расположена на задних панелях блоков. Управление работой УМ, связь с нагрузкой и съем сигналов, пропорциональных току и напряжению в нагрузке, реализуются по передней панели. УМ питается от сети 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность 120 Вт. Для уменьшения влияния помех "земля" схем УМ изолирована от корпуса. УМ имеет режимы стабилизации мощности или напряжения. На нагрузке 1 ÷ 6 кОм диапазон выходных напряжений УМ составляет 0 ÷ 100 В и 0 ÷ 200 В с рабочими областями 20 ÷ 100 В и 100 ÷ 200 В соответственно, максимальная мощность УМ 40 Вт, нестабильность мощности ≤ 4%. Минимальная длительность фронтов импульсов мощности не превышает 20 мкс, а в режиме стабилизации напряжения ≤ 10 мкс. Максимальная длительность импульсов неограничена (определяется только условиями эксперимента).

Блок трансформаторов (БТ) и блок питающих напряжений (БПН) обеспечивают питание схем и управление режимами работы УМ. Главный узел УМ располагается в блоке усилителя мощности (БУМ). Блок согласования (БС) обеспечивает измерение величины

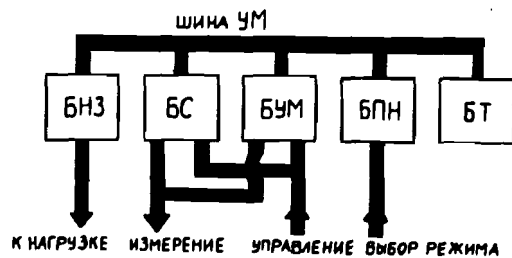


Рис.1. Структурная схема усилителя мощности.

сопротивления ТВЭ в отсутствие импульсов мощности. Блок нагрузок и защиты (БНЗ) содержит набор сопротивлений из рабочего диапазона для настройки и проверки работы БУМ и устройство, отвечающее за защиту УМ от перегрузок.

СТРУКТУРНАЯ И ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМЫ

На рис.2 изображена структурная схема БУМ, разработанная для проведения исследований нестационарных тепловых процессов.

Основной узел схемы, обеспечивающий выдачу стабилизированной мощности в нагрузку (R_H), состоит из следующих элементов:

- операционный усилитель 3 (ОУ3), осуществляющий усиление разности управляющего сигнала и сигнала обратной связи;
- выходной транзистор (Т), усиливающий по мощности сигнал с ОУ3;
- шунт $R_{ш}$, включенный последовательно с R_H ;
- делитель напряжения ($R_{д1}, R_{д2}$);
- схема обратной связи (ОС), в которой производится перемножение сигналов с делителя напряжения и шунта с целью получения сигнала, пропорционального мощности в нагрузке.

Управляющий сигнал, определяющий уровень и длительность импульса мощности на нагрузке, формируется с помощью ключа К и буферного ОУ1. Этот сигнал приходит на один из входов ОУ2, выполняющего роль сумматора. На другой вход сумматора поступает с буферного

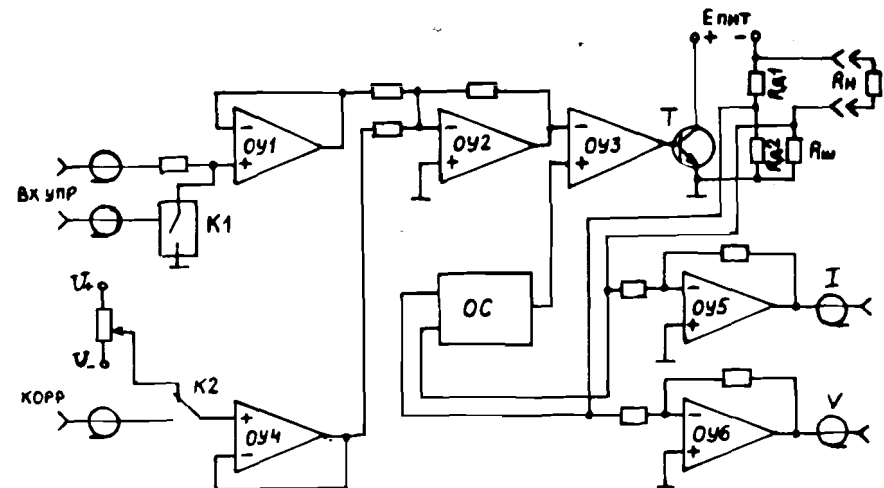


Рис.2. Структурная схема блока усилителя мощности.

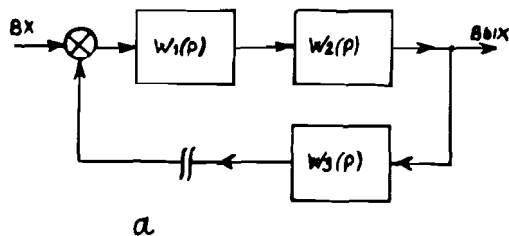
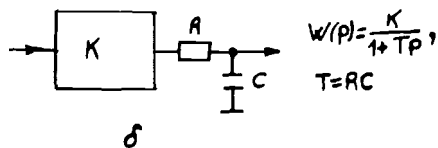


Рис.3. Динамическая модель усилителя с обратной связью.



усилителя ОУ4 сигнал коррекции. Таким образом, на входе ОУ3 будет полностью сформированный управляющий сигнал.

Операционные усилители ОУ5 и ОУ6 нормируют сигналы, пропорциональные току I и напряжению V в нагрузке, для последующего измерения их аналого-цифровыми преобразователями.

Одновременное измерение сигналов V и I дает также возможность контролировать правильность работы УМ.

Разработка принципиальной схемы формирования управляющего сигнала и схемы, отвечающей за сигналы V и I , не представляет особой сложности. Вместе с тем разработка принципиальной схемы основного узла БУМ (ОУ3, Т, ОС, $R_{д1}$, $R_{д2}$, $R_{ш}$, $R_{н}$) вызывает определенные трудности. Связано это с необходимостью обеспечить устойчивость усилителя с обратной связью, исходя из необходимого быстродействия и точности стабилизации. Для решения этого вопроса данный узел был разбит на три звена и из них составлена модель для анализа. На этой модели (рис.3а) передаточное звено $W1(p)$ соответствует ОУ3, $W2(p)$ — Т, $W3(p)$ — схеме ОС. В первом приближении эти звенья можно представить аperiodическими звеньями первого порядка^{14, 15}, описываемыми передаточными функциями вида $W(p) = K/(1 + Tp)$, где K — коэффициент передачи звена, T — постоянная времени, $p = j\omega$ — оператор. При этом надо отметить, что аperiodическое звено первого порядка может моделироваться RC-цепью.

Существует несколько критериев устойчивости: алгебраический (Рауса — Гурвица), Михайлова, частотный (Найквиста — Михайлова) и др.¹⁵. Наиболее широко для определения устойчивости такой системы, как усилитель с обратной связью, применяется критерий Найквиста с использованием логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАХ) и логарифмических фазово-частотных характеристик (ЛФХ) разомкнутой системы. Критерий устойчивости по виду ЛАХ и ЛФХ заключается в том, что замкнутая система устойчива, если на частоте ω , для которой набег фазового сдвига равен 180° , ордината ЛАХ разомкнутой системы отрицательна¹⁵.

Передаточная функция разомкнутой системы (рис.3):

$$W(p) = W1(p)W2(p)W3(p) = \frac{K}{(1 + pT1)(1 + pT2)(1 + pT3)},$$

где $K = K1K2K3$ — коэффициент передачи разомкнутой системы. Построение ЛАХ и ЛФХ производится по выражениям

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T1)^2} \sqrt{1 + (\omega T2)^2} \sqrt{1 + (\omega T3)^2}},$$

$$\Psi(\omega) = 180 - \arctg(\omega T1) - \arctg(\omega T2) - \arctg(\omega T3).$$

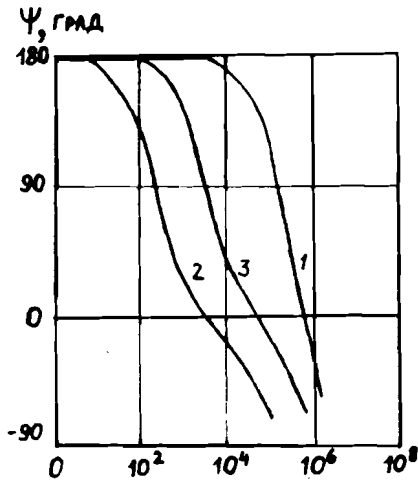
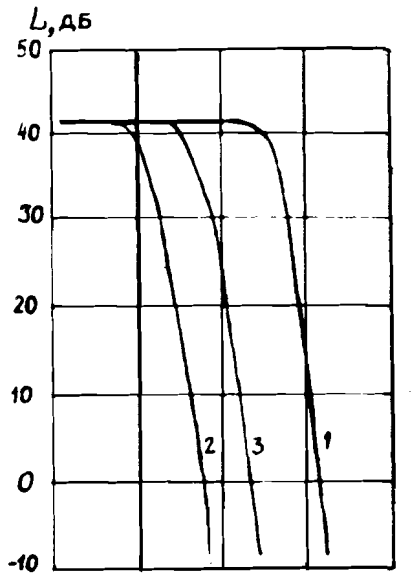
Коэффициент передачи разомкнутой системы определяется из условия обеспечения точности стабилизации (не хуже $2 \div 4\%$) и выбирается равным $K \geq 120$. Постоянные времени звеньев, входящих в состав системы, определенные как экспериментально, так и из литературных данных^{16, 17}, имеют значения $T1 = 3,2$ мкс, $T2 = 2,5$ мкс, $T3 = 3,0$ мкс.

На рис.4 представлены результаты построения ЛАХ и ЛФХ для некоторых значений постоянных времени звеньев системы, где 1 — $T1 = 3,2$ мкс, $T2 = 2,5$ мкс, $T3 = 3,0$ мкс; 2 — $T1 = 500$ мкс, $T2 = 350$ мкс, $T3 = 3,0$ мкс; 3 — $T1 = 350$ мкс, $T2 = 150$ мкс, $T3 = 3,0$ мкс. Из кривых ЛАХ и ЛФХ видно, что при указанных постоянных времени звеньев системы для кривых 3 замкнутая система будет устойчива.

Правильность расчетов была подтверждена на аналоговой модели на операционных усилителях (рис.5). Следовательно, полученные значения постоянных времени и коэффициенты передачи могут использоваться в качестве исходных данных при разработке принципиальной схемы усилителя мощности.

На рис.6 представлена принципиальная схема БУМ, где $M1$ — К155ЛАВ, $M2$ — М4, М8, М9 — К140УД8А, $M5$, $M6$ — К574УД1Б, $M7$ — КГ02-УА1, $M10$ — К155АГ3, $T1$, $T4$ — КТ608Б, $T2$ — КТ907А, $T3$, $T5$ — КТ809А, Д1 — АЛ307А, Д2-Д6 — КД521А, К1 — П1Т-1-1В, К2, К3 — РЭС55А, T_p — трансформатор на сердечнике М1000НМ с обмотками по 40 витков. С целью упрощения не изображены элементы схемы для питания реле и микросхем, элементы схемы защиты от перегрузок и элементы схемы, отвечающие за измерение сопротивления нагрузки в отсутствие мощности.

Конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ относятся к корректирующим. Вместе с элементами схем они создают необходимые постоянные времени узлов принципиальной схемы для обеспечения устойчивости усилителя мощности.



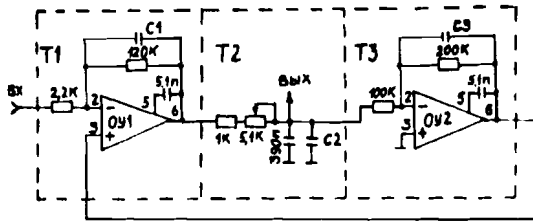
время значительно сокращается, а задний фронт импульса мощности на нагрузке не превышает значение ≤ 20 мкс.

Как отмечалось, блок БУМ может работать в режимах стабилизации напряжения или мощности. Не представляет особого труда и реализация режима стабилизации тока.

Применение двух диапазонов (по выходному напряжению) $0 \div 100$ В и $0 \div 200$ В (с рабочими областями $20 \div 100$ В и $100 \div 200$ В) вызвано необходимостью удовлетворения поставленным требованиям к параметрам импульсов мощности на нагрузке.

Рис.4. ЛАХ и ЛФХ для разомкнутой системы.

Рис.5. Принципиальная схема аналоговой модели системы.



Режим работы мощного выходного транзистора Т3 характеризуется тем, что в исходном состоянии он заперт, а после подачи управляющего сигнала он переходит в активную область и в случае окончания управляющего воздействия транзистор Т3 снова переходит в запертое состояние. При этом длительность заднего фронта импульса мощности на нагрузке будет определяться в основном постоянной времени $T = C2R_H$. Для того чтобы существенно сократить длительность заднего фронта (≤ 20 мкс), применяется узел, состоящий из М10, Т4, Т_p, Т5. Принцип работы этого узла основан на том, что из заднего фронта управляющего импульса формируется импульс отпирания для транзистора Т5. Таким образом, параллельно R_H подключается сопротивление $R=68$ Ом и в результате этого постоянная времени

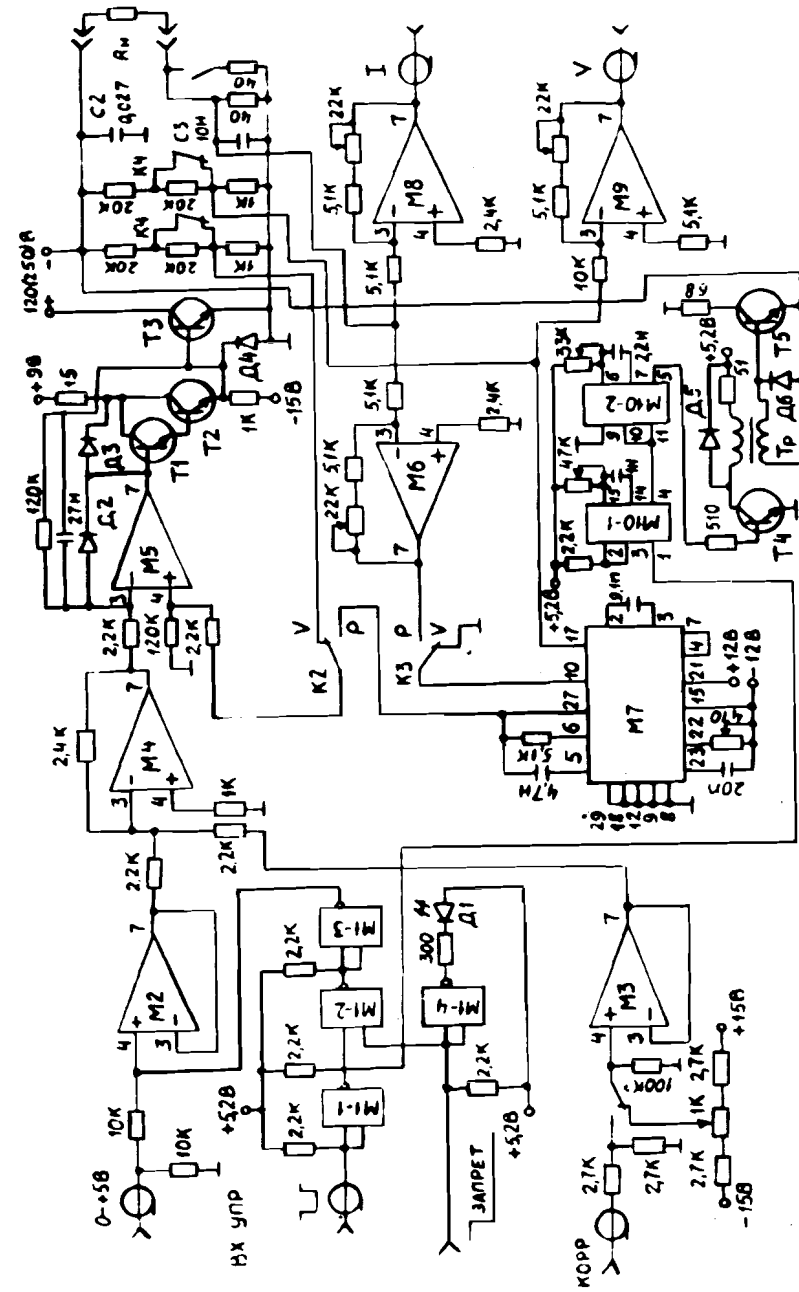


Рис.6. Принципиальная схема блока усилителя мощности.

В связи с тем, что измерение значения сопротивления R_n (следовательно, и температуры поверхности ТВЭ) производится путем одновременного измерения напряжения и тока в нагрузке, необходимо располагать зависимостями между величиной напряжения (тока) на нагрузке и величиной напряжения на выходе $V(I)$. Анализ этих зависимостей показал, что в рабочем диапазоне их можно аппроксимировать функцией вида $V_n = V_{n0} + K(V_{тек} - V_0)$, где V_n — напряжение на нагрузке, K — коэффициент наклона, равный $K = (V_{n0''} - V_{n0}) / (V_0'' - V_0)$, $V_{n0''}$ и V_{n0} — напряжения на нагрузке, определяющие начальную и конечную точки диапазона, V_0'' и V_0 — напряжения на выходе V БУМ, соответствующие этим точкам, $V_{тек}$ — текущее значение на выходе V . Необходимые величины для канала измерения тока в нагрузке определяются аналогично. Максимальная погрешность измерения $V_n(I_n)$ при применении такой методики не превышала 0,5% на всех диапазонах.

ОПИСАНИЕ БТ И БПН

Работа элементов схем УМ (микросхем, реле и т.д.) требует стабильных напряжений постоянного тока ± 24 , $+6$, $+9$ и $120(250)$ В для питания мощного выходного каскада БУМ. Источник питания $120(250)$ В

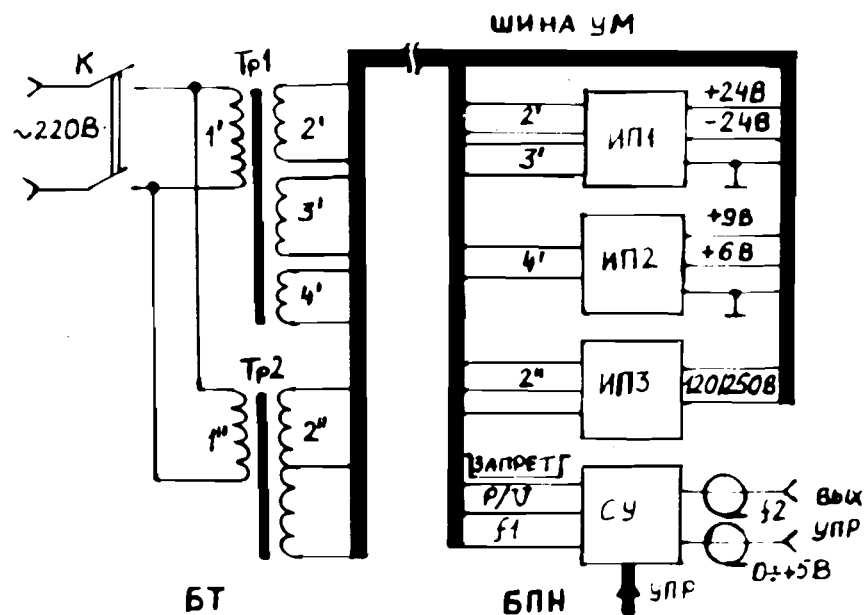


Рис. 7. Организация питания и выбора режима работы усилителя мощности.

является нестабилизированным и для снижения мощности на транзисторе выходного каскада имеет разное значение в каждом диапазоне.

Организация питания и выбора режима работы УМ приведена на рис.7. БТ содержит два трансформатора T_{p1} и T_{p2} , которые с помощью тумблера K подключаются к сети. Раздельное питание управляющей и силовой частей УМ позволяет ослабить влияние силовой части на управляющую по питанию. Кроме этого, в БТ содержится сетевой фильтр. В БПН из переменных напряжений со вторичных обмоток T_{p1} и T_{p2} в источниках питания ИП1, ИП2, ИП3 формируются требуемые для работы УМ напряжения.

Схема управления (СУ) обеспечивает защиту от возможных перегрузок элементов схем при переключении диапазонов или при изменении режима стабилизации. Для оперативного контроля правильности работы УМ в СУ содержится генератор управляющих импульсов и регулируемый источник постоянного напряжения $+0\pm 5$ В. Управление выбором режима и диапазона работы УМ производится с передней панели БПН.

ОПИСАНИЕ БНЗ

Блок БНЗ предназначен для защиты элементов БУМ от перегрузок и обеспечения эквивалентной нагрузки при проверке работоспособности УМ. При этом эквивалентная нагрузка, кроме необходимого диапазона сопротивления и допустимой мощности, не должна выходить за пределы рабочего диапазона при переключении от одного значения к другому. В противном случае при использовании режима стабилизации мощности произойдет перегрузка по выходному напряжению. Поэтому изменение нагрузки целесообразно осуществлять путем подключения параллельно максимальному значению сопротивления нагрузки соответствующего номинала.

Для проверки реакции усилителя мощности на ступенчатое изменение сопротивления нагрузки может использоваться схема активной нагрузки (рис.8), где OB — одновибратор, T — транзистор, T_p — трансформатор, D — тиристор. Скорость изменения нагрузки от значения $R_n = R2$ до значения $R_n = R2 \parallel R1$ определяется временем включения тиристора D и для тиристора типа КУ101Е не более 2 мкс^{18} . Было установлено,

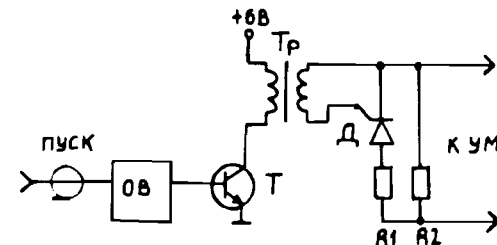


Рис. 8. Схема активной нагрузки.

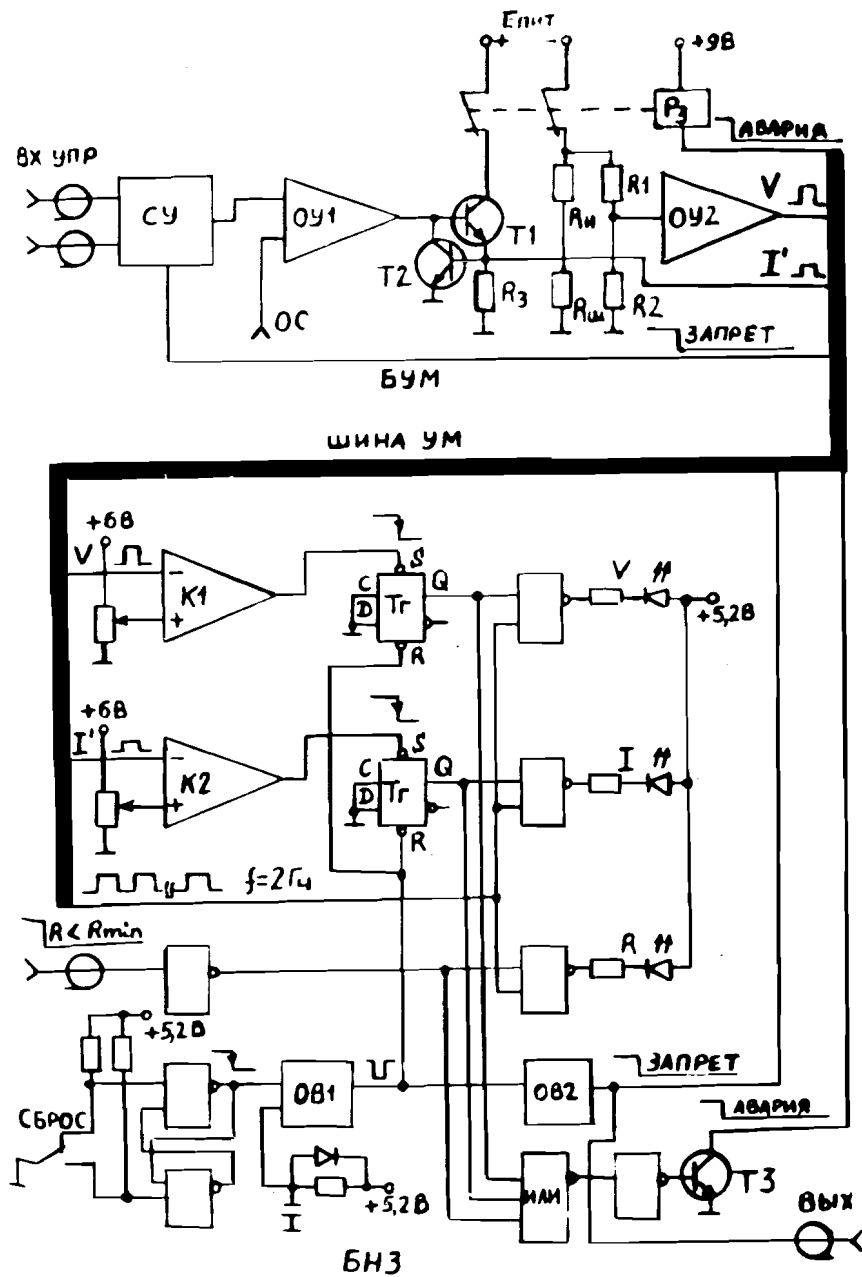


Рис.9. Организация защиты усилителя мощности.

что УМ устойчиво работает и время реакции УМ на изменение нагрузки (с 3,9 до 1,95 кОм) не превышает 20 мкс. Это отвечает поставленным требованиям к УМ.

Устройство защиты УМ выполняет следующие функции:

- защиту от перегрузок элементов БУМ при коротком замыкании на выходе и от превышения рабочего диапазона напряжения на выходе УМ;
- отключение выхода УМ от нагрузки при поступлении сигнала о выходе нагрузки из рабочего диапазона.

На рис.9 показана организация защиты УМ, где СУ – схема управления, ОС – сигнал со схемы обратной связи, T1, T2, T3 – транзисторы, ОУ1, ОУ2 – операционные усилители, P₃ – реле защиты, K1, K2 – компараторы, T_r – триггер, ОБ1, ОБ2 – одновибраторы.

Защита обеспечивается следующим образом. При превышении тока $I_n > I_{\text{макс}}$ включается схема ограничения тока нагрузки (T2, R₃), срабатывает компаратор K2 и T_r устанавливается в положение "1". Из этого сигнала формируются сигнал "Запрет", который не позволяет проходить управляющему сигналу на ОУ1, и сигнал "Авария", после чего реле P₃ включается на размыкание. В случае $V_n > V_{\text{нмакс}}$ защита обеспечивается аналогично. Использование реле P₃ повышает надежность защиты, так как в случае пробоя проходного транзистора и замыкании коллектора на эмиттер (обычная неисправность) защита по входной цепи не сработает. Это приведет к тому, что все напряжение питания E_{пит} будет приложено к нагрузке.

При проведении экспериментов может сложиться ситуация, когда нагрузка выйдет из рабочего диапазона (например прекращение охлаждения и т.п.). В то же время УМ не перегружается. Следовательно, существует опасность перегрева ТВЭ. На рис.10 изображен один из вариантов организации защиты нагрузки в этом случае. Для каждого уровня выходной мощности устанавливается определенное значение выходного напряжения цифроаналогового преобразователя (ЦАП). При выходе сопротивления R_n из рабочего диапазона возрастает ток в нагрузке I, срабатывает компаратор K и триггер T_r устанавливается в положение "0". Этот сигнал при поступлении на вход БНЗ (вход R_n < R_{мин}, рис.9) вызовет срабатывание защиты.

Для удобства обнаружения источника перегрузки производится соответствующая индикация.

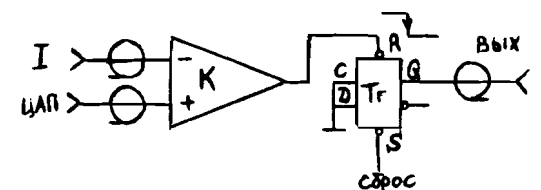


Рис.10. Организация защиты R_n.

ОПИСАНИЕ БС

С помощью БС измеряется сопротивление нагрузки в отсутствие мощности в ней. Измерение организовано следующим образом (рис.11). В моменты, когда мощность в нагрузке отсутствует, подаются измерительные стробы (СТ). Из этих стробов с использованием одновибраторов ОВ1, ОВ2, ОВ3 формируются импульсы напряжения на нагрузку (с амплитудой 6 В и длительностью $10 \div 20$ мкс) и стробы СТ для запуска АЦП на измерение. Так как на нагрузку подаются импульсы напряжения, то для измерения сопротивления нагрузки достаточно знать величину тока в нагрузке. При этом для повышения точности измерения сигнал, пропорциональный току нагрузки, с выхода I блока БУМ усиливается ОУ3. С помощью реле Р устанавливается коэффициент усиления ОУ3, соответствующий диапазону работы УМ. Состоящая из ключа К и $R_{огр}$ цепь устраняет перегрузку ОУ3, когда на нагрузку подаются импульсы мощности.

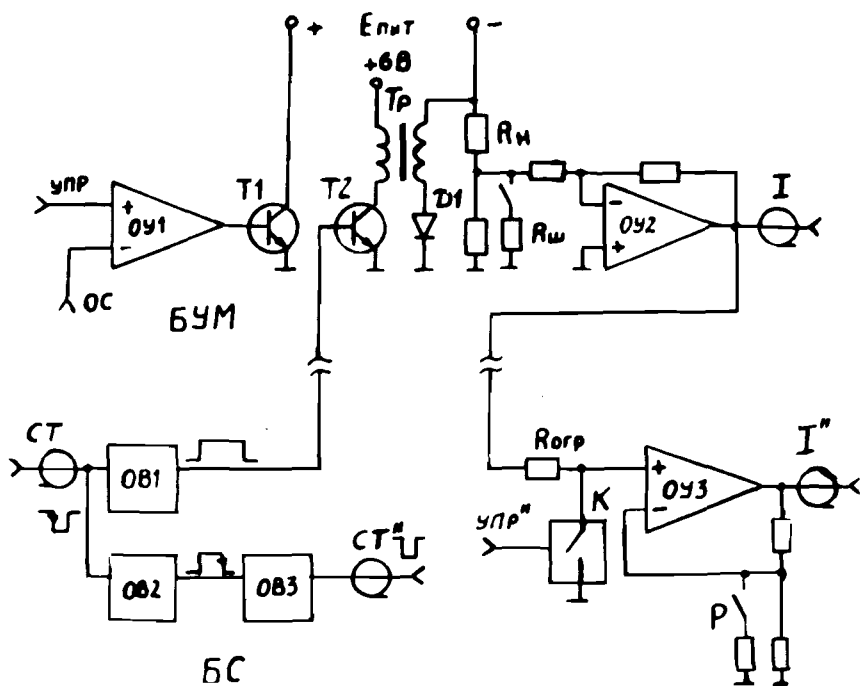


Рис.11. Организация измерения R_n в отсутствие импульса мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные и созданные УМ входят в состав шестиканальной экспериментальной системы¹², используемой для исследований нестационарной теплопередачи к нормальному и сверхтекучему гелию при импульсных тепловых нагрузках. С помощью этой системы обнаружена область тепловой неустойчивости, в пределах которой наблюдается ряд нелинейных эффектов¹⁹ в системе "твердое тело — нормальный гелий". При изучении тепловых режимов твердого тела в сверхтекучем гелии обнаружен срыв интенсивных мод передачи тепла, вызванный развитием состояния сверхтекучей турбулентности¹⁰. В настоящее время система используется для исследования импульсной теплопередачи в системах, криостатируемых двухфазным гелием.

В заключение автор выражает глубокую признательность В.Д.Инкину за полезные обсуждения и помощь в работе, Ю.П.Филиппову — за постановку задач и содействие в их практической реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iwasa Y., Apgar V.A. — *Cryogenics*, 1978, v.18, p.267.
2. Минашкин В.Ф. и др. — *Сообщение ОИЯИ Р10-88-902*, Дубна, 1988.
3. Мамедов И.С. и др. — *ИФЖ*, 1983, т. XIV, 15, с.725.
4. Шило В.Л. — *Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре*. М.: Советское радио, 1979.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. — *Теория систем автоматического регулирования*. М.: Наука, 1975.
6. Хоровиц П., Хилл У. — *Искусство схемотехники*. М.: Мир, 1984.
7. Аронов В.Л. и др. — *Полупроводниковые приборы: транзисторы*. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Баюков В.А. и др. — *Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы*. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Микляев В.М. и др. — В сб.: *Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий*. Новосибирск: Наука, 1987, т.2, с.53.
10. Filippov Yu.P. et al. — In: *Proc. 12th Intern. Cryog. Engineering Conf.*, UK, 1989, p. 297, Butterworth.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1989 года.