

И Н С Т И Т У Т¹⁵
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ ИЯФ 74-34

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко,
М.М.Карлинер, С.П.Петров

**СТАБИЛИЗАТОР ТОКА ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО
КОЛЬЦА ВЭПП-2М**

Новосибирск

1974

СТАБИЛИЗАТОР ТОКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ВЭП-2М

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
С.П.Петров

А Н Н О Т А Ц И Я

Система питания выполнена на управляемом тиристорном преобразователе, предназначена для питания стабилизированным током электромагнитов накопительного кольца ВЭП-2М. В системе питания обеспечены длительная стабильность и подавление пульсаций в токе с погрешностью не более 0,01%. Максимальный стабилизированный ток 8 КА, мощность 0,8 МВт. Погрешность 0,01% сохраняется при перестройке выходного тока до $0,1 I_{max}$. В системе питания уровень тока и скорость его перестройки устанавливается вручную или с помощью ЭВМ "Параметр" через цифроаналоговые преобразователи по соответствующей программе. Система находится в эксплуатации с января 1973 г.

Питание электромагнитов электрон-позитронного накопительного кольца ВЭШ-2М (I) осуществляется от мощного управляемого тиристорного преобразователя. Активное сопротивление обмоток магнита составляет $1,3 \cdot 10^{-2}$ Ом. Индуктивность магнита равна $2 \cdot 10^{-3}$ Г. При максимальной энергии накопленных частиц около 670 МэВ значение тока в обмотках электромагнита составляет 7,5–8 КА. В процессе ускорения частиц от энергии инжекции до максимальной энергии производится перестройка тока в 6 раз. Частотная характеристика электромагнита (ЛАХ) приведена на рис.6а. Нестабильность тока питания в режиме инжекции и в режиме физического эксперимента на максимальной энергии не должна быть более $1 \cdot 10^{-4}$. При этом в токе не должно быть пульсаций, особенно низкочастотных, более $1 \cdot 10^{-4}$.

В схеме системы питания используются девять понижающих трансформаторов типа ОСУ-100 Московского трансформаторного завода. Наиболее приемлемой оказалась схема соединения первичных обмоток в параллельные "треугольники" на напряжение 220/380 В и вторичных обмоток в параллельные "звезды" на выходное напряжение 49/85 В. В качестве выпрямителя выбрана трехфазная мостовая (шестищечная) схема, которая приведена на рис.1. В выбранном режиме имеет место некоторая перегрузка по выходному току трансформаторов ~ 6%. Суммарные потери в трансформаторах составляют 25–30 кВт.

В рассматриваемой трехфазной мостовой схеме выпрямителя среднее значение тока через плечо равно 2,65 КА. Учитывая, что при загрузке выпрямителя номинальным током трудно обеспечить равенство токов в параллельно соединенных тиристорах, а также принимая во внимание существенное увеличение времени безотказной работы тиристоров при их работе в облегченных режимах, выбираем ток загрузки тиристоров $(0,5-0,6) \cdot I$ ном. При этом количество параллельно соединенных тиристоров в плече составляет 30 штук. Параллельное включение тиристоров осложняется в связи с тем, что тиристоры имеют разброс по времени включения (от 3 до 15 мкс) и по внутреннему сопротивлению в статическом и динамическом режимах. Следствием этого является перераспределение тока,

при котором тиристоры с меньшим сопротивлением оказываются перегруженными, а с большим сопротивлением испытывают недогрузку. Путем подбора тиристорov, включенных в параллельные ветви, по прямому падению напряжения при максимальном рабочем токе можно существенно улучшить распределение токов. Для рассматриваемой системы был произведен отбор из партии тиристорov типа Т-150 в группы по 45 штук (с резервом для замены вышедших из строя тиристорov). Оказалось возможным распределить тиристоры в группы с максимальным разбросом прямого падения напряжения в каждой не более 60 мВ. Амплитуда импульсов тока через каждый тиристор составляет 265 А, следовательно для 10% выравнивания токов в тиристорах с максимально отличающимися падениями напряжения требуется включение последовательно с тиристором сопротивления величиной:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{30} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Для выравнивания распределения токов на фронте при включении тиристорov и снижения скорости нарастания тока через тиристор до уровня 10 А/мкс последовательно с тиристором необходимо включить индуктивность величиной:

$$L = \frac{U_{имп}}{dI/dt} = \frac{100}{10} = 10 \text{ мкГ.}$$

В рассматриваемой системе последовательно с каждым тиристором включен безжелезный дроссель, навитый из медной шины сечением 3x6 мм. Активное сопротивление дросселя составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Ом, индуктивность равна $10 \cdot 10^{-6}$ Г. Каждый дроссель при максимальном токе нагрузки рассеивает 60 Вт.

Исследования, проведенные при эксплуатации тиристорov типа Т-150 в номинальном режиме в течение 3000 часов, показали (2), что прямое падение напряжения увеличивается со временем и может достигнуть удвоенной первоначальной величины. Это возможно приведет к тому, что с увеличением времени эксплуатации распределение токов улучшится, так как очевидно, что падение напряжения будет быстрее увеличиваться в перегруженных тиристорах.

Для защиты тиристорov при прохождении аварийных токов последовательно с ними включены быстродействующие плавкие предохранители типа ПНБ-220/250. Плавкие предохранители обеспечивают

защиту в случае короткого замыкания тиристорov. Для надежной защиты тиристора полный интеграл отключения предохранителя

$I^2 \cdot t$ ($A^2 \cdot c$) должен быть меньше аналогичного показателя тиристора. Полный интеграл отключения предохранителей равен $20-30 \cdot 10^4 A^2 \cdot c$ (4). Защитный показатель для тиристора Т-150 равен $20 \cdot 10^3 A^2 \cdot c$. Следовательно, предохранитель не может защитить отдельный тиристор, но при параллельном соединении 30 тиристорov обеспечена надежная защита системы при выходе из строя какого-либо из них. В случае короткого замыкания нагрузки предусмотрена защита по максимальному току. В силовых шинах 220/380 В установлены трансформаторы тока, которые при превышении заданного уровня тока выдают сигнал на запирающие тиристорov выпрямителя и отключение быстродействующего выключателя АВМ-10.

Параллельно выходу выпрямителя включен обратный диод, устраняющий отрицательные импульсы в выходном напряжении при малых значениях угла открывания тиристорov и пропускающий через себя спадающий ток нагрузки при аварийном отключении системы.

Для фильтрации переменной составляющей выпрямленного напряжения в системе предусмотрен Г-образный LC-фильтр. Параметры фильтра: $L = (100-30) \cdot 10^{-6}$ Г, $C = 0,6 \text{ Ф}$. Индуктивность дросселя падает с увеличением тока нагрузки, и при этом резонансная частота фильтра изменяется от 18 до 32 Гц. Фильтр обладает довольно высокой добротностью. Показатель колебательности фильтра равен 0,1-0,15. Частотная характеристика фильтра приведена на рис. 65

Управление тиристорным преобразователем осуществляется от блока управления, в котором входное управляющее напряжение (постоянное или медленно меняющееся по отношению к частоте сети) преобразуется в фазу запускающих импульсов относительно соответствующей фазы синусоиды питающего напряжения. Функциональная схема блока управления приведена на рис. 2. Схема синхронизации представляет собой три одинаковых выпрямителя, показанных на рис. 3. Задающий трансформатор включен в цепь питающего напряжения между фазой и нулевым проводом. При прохождении задающего напряжения через нуль один из транзисторов Т1 или Т2 открывается

и через 180° закрывается. пилообразное напряжение формируется при заряде емкости C_1 (C_2) от источника стабильного напряжения после закрытия соответствующего транзистора. Полученное пилообразное напряжение сравнивается с входным напряжением. На выходе нуля-органа формируется импульс с длительностью 300 мкс. Для обеспечения нормальной работы тиристорного выпрямителя, собранного по схеме Ларионова при углах открывания более 60° , т.е. при переходе в режим непрерывных токов, на управляющие электроды тиристоров необходимо подавать двоянные импульсы. Второй импульс необходим при перераспределении токов между плечами выпрямителя для повторного запуска ранее включенного тиристора. Необходимое распределение импульсов управления между плечами тиристорного моста обеспечивает логическое устройство, после которого импульсы управления усиливаются выходным трансформаторным каскадом. Точность работы блока управления зависит от стабильности порога схемы синхронизации, временных и температурных изменений величин сопротивлений и емкостей в схемах формирования пилы, уходов порогов нуля-органов. Суммарная нестабильность фаз управляющих импульсов при работе в температурном диапазоне от 15°C до 35°C не превышает $2-3^\circ\text{C}$. Параметры выходных импульсов: $U_{\text{кк}} = 15 \text{ В}$; $T_{\text{и}} = 30-400 \text{ мкс}$; $I_{\text{max}} = 0,4-0,5 \text{ А}$.

Для обеспечения необходимой точности поддержания выходного тока все блоки системы объединены в замкнутую систему автоматического регулирования. Была рассмотрена (и в первоначальный период работы системы использовалась) упрощенная блок-схема регулирования тока, указанная на рис.4. Сигнал, пропорциональный току через масштабный усилитель ПУ1 подается на один из входов усилителя сигнала ошибки УСО1, где сравнивается с опорным напряжением. Для обеспечения устойчивой работы системы при замыкании обратной связи потребовалось введение корректирующей интегрирующей цепочки с постоянной времени $50-100 \text{ с}$. В данной системе не удалось обеспечить погрешность менее $0,1\%$ ввиду наличия в питающем сетевом напряжении аperiodических скачков амплитудой $1-2\%$. Кроме того, любые кратковременные возмущения в системе вызывают раскачку колебаний на резонансной частоте фильтра ввиду его высокой колебательности.

Для обеспечения требуемой $1 \cdot 10^{-4}$ погрешности были введены дополнительные контуры обратной связи, фактически образовавшие самостоятельные системы, рис.5. Контур К1 образует стабилизатор напряжения с расширенным диапазоном частот, охватывающим как кратковременные скачки питающего напряжения, так и резонансные колебания LC фильтра. При рассмотрении замкнутой системы, включающей тиристорный преобразователь и обладающей достаточно широкой полосой оказалось необходимым обратить внимание на возможность возникновения в системе специфического возбуждения, обусловленного дискретностью преобразователя. Как показано в (7) в подобных системах могут возникать даже при обеспечении линейной устойчивости субгармонические колебания на частоте:

$$f_{\text{возб}} = \frac{m \cdot f}{2}$$

m - число фаз преобразователя f - частота питающей сети. В нашем случае $m = 6$, $f = 50$, следовательно $f_{\text{возб}} = 150 \text{ Гц}$. Автоколебания, обусловленные неполной управляемостью вентилей преобразователя в данной системе могут не рассматриваться, так как для их возникновения (6) необходимо наличие достаточно больших возмущений. В нашем случае система работает в режиме малых отклонений, так как все перестройки тока происходят за времена во много раз больше характерных времен преобразователя. Условие отсутствия субгармонических колебаний, накладывающее ограничение на вид частотной характеристики системы можно записать в виде (7):

$$B(\Omega_{\text{зр}}) \cdot \cos \Delta\varphi(\Omega_{\text{зр}}) < \frac{m}{2\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}$$

где $B(\Omega)$ - модуль коэффициента усиления разомкнутого контура, $\Delta\varphi$ - запас системы по фазе на частоте Ω :

$$\Omega_{\text{зр}} = 150 \text{ Гц}, \quad m = 6$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика контура стабилизации напряжения приведена на рис.6в. В худшем с точки зрения устойчивости случае, т.е. при максимальной резонансной частоте фильтра $\Delta\varphi = 40^\circ$; $B(\Omega_{\text{зр}}) = -6 \text{ дБ}$ и, следовательно:

$$0,5 \cdot \cos 40^\circ < \frac{6}{2\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{6}; \quad 0,385 < 0,48$$

как видно, условие устойчивости системы к субгармоническому возбуждению выполняется.

Для уменьшения пульсаций выходного напряжения с частотой 50–300 Гц до требуемого уровня используется независимый контур местной обратной связи. В контур подавления пульсаций входят трансформатор, включенный последовательно с нагрузкой и имеющий полосу пропускания 5–10000 Гц, усилитель мощности, обеспечивающий в нагрузку мощность 600–800 Вт и усилитель сигнала ошибки (рис.5). Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутого контура подавления пульсаций приведена на рис.6г.

Стабилизация по току осуществляется по основной петле обратной связи (контур КЗ на рис.5), в которую входят контур стабилизации по напряжению – К1, контур подавления пульсаций – К2, электромагниты установки ВЭШ-2М в качестве нагрузки, измерительный шунт, предварительный масштабный усилитель и усилитель ошибки. Суммарная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика, а также фазо-частотная характеристика разомкнутой системы стабилизации тока приведены на рис.6д. После замыкания обратной связи частотная характеристика приобретает вид, показанный на рис.6е.

Элементы, входящие в систему и не описанные выше имеют следующие характеристики:

Измерительный шунт выполнен из стабилизированного марганца, охлаждаемого проточной дистиллированной водой. Напряжение, снимаемое с шунта при максимальном токе составляет 0,75В. Усилитель постоянного тока (масштабный предварительный усилитель) используется для усиления напряжения с шунта и обеспечивает развязку по синфазной составляющей помехи. Выполнен по схеме М – ДМ с модулятором на полевых транзисторах. Частота модуляции 5 КГц. Напряжение температурного дрейфа составляет 0,5 мкВ/°С. Подавление синфазной составляющей помехи до 120 дБ на частоте 50 Гц. Коэффициент усиления ~ 7 . Усилитель ошибки представляет собой аналогичный усилитель с усилением, изменяемым в пределах 400–4000. Нестабильность коэффициента усиления 5%. Выходное напряжение ± 10 В. Усилители, включенные в контуры стабилизации по напряжению и подавления пульсаций выполнены на интегральных схемах типа IUT402Б.

Управление системой осуществляется с помощью ЭВМ "Параметр" через цифроаналоговые преобразователи. Опорный источник позволяет

производить перестройку уровня тока в электромагните с заданной скоростью. Предусмотрена возможность ручной установки уровня и скорости перестройки тока.

Конструктивно тиристорный преобразователь вместе с питающими трансформаторами размещен в отдельном помещении, что позволило осуществить воздушное охлаждение элементов системы при помощи вытяжной вентиляции. Тиристоры установлены на шинах, охлаждаемых проточной водой. Для уменьшения рассеянных электромагнитных полей силовые подводы и тиристорные сборки выполнены бифилярно.

Система снабжена рядом блокировок и защитных устройств, позволяющих отключить силовое питание в аварийной ситуации.

Система стабилизации тока электромагнита установки ВЭШ-2М находится в эксплуатации с января 1973 года.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность всем, принимавшим участие в обсуждении, проектировании и изготовлении системы.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Буджер, В.Е.Балакин, Л.М.Барков, В.Н.Боровиков, И.Б.Васерман, Э.Л.Зинин, М.М.Карлинер, И.Я.Кооп, А.А.Лифшиц, А.П.Лысенко, С.И.Мишнев, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Э.М.Трахтенберг, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов.
Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭП-2М Новосибирского Института ядерной физики. Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 2-4 октября 1972г., т.1, стр.318. Наука, 1973 г.
2. В.М.Бардин, Л.Г.Моисеев, Ж.Г.Сурочан, О.Г.Чебоковский.
Аппаратура и методы контроля параметров силовых полупроводниковых вентилях. М., 1971 г.
3. Предохранители с наполнением быстродействующие серии ПНБ5 и ПНБ5Т. Техническое описание и инструкция по монтажу и эксплуатации № 149.004-67.
4. Е.М.Глух, В.Е.Зеленов, Защита полупроводниковых преобразователей. М., 1970г.
5. Н.Х.Ситник. Силовая полупроводниковая техника. М., 1968г.
6. Шипило В.П. Вентильный преобразователь как элемент системы автоматического регулирования, Электричество № II, 1967 г.
7. Шипило В.П. Субгармонические автоколебания в замкнутых системах регулирования с вентильным преобразователем. Электричество № I, 1969 г.
8. В.Г.Коган, Ф.Д.Кочубиевский, В.М.Шугрин. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Нелинейные системы с тиристорами. М., 1968г. БНА.
9. Ж.Лекоргий. Управляемые электрические вентили и их применение, М., 1971 г.
10. Полупроводниковые выпрямители. Под ред. Ф.И.Ковалева, М., 1967г.
11. В.С.Богрий, А.А.Русских. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. М., 1972г.
12. Тиристоры и их применение в преобразовательной технике и электроприводе. (Эл.техн.пром.за рубежом)., М., 1966г.

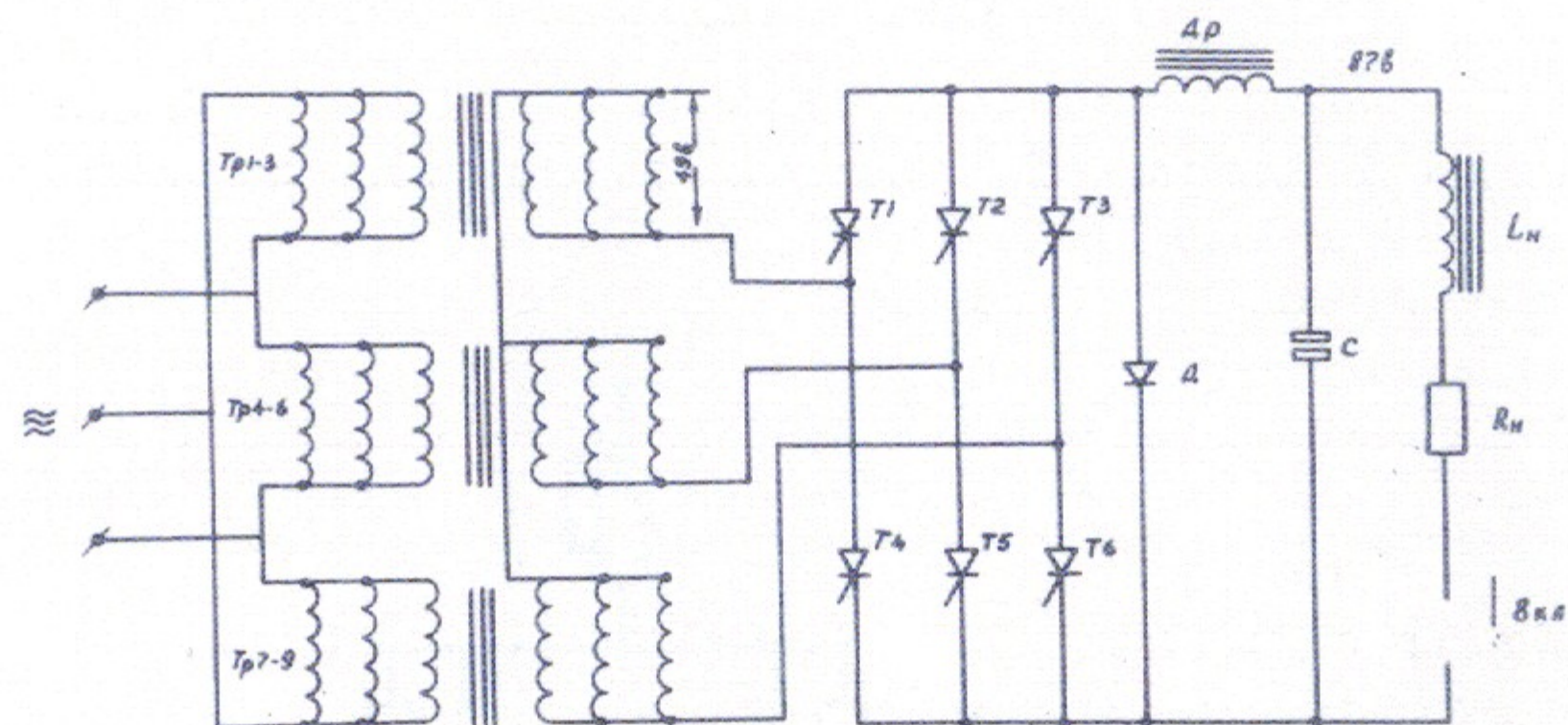


Рис.1. Электрическая схема тиристорного преобразователя.

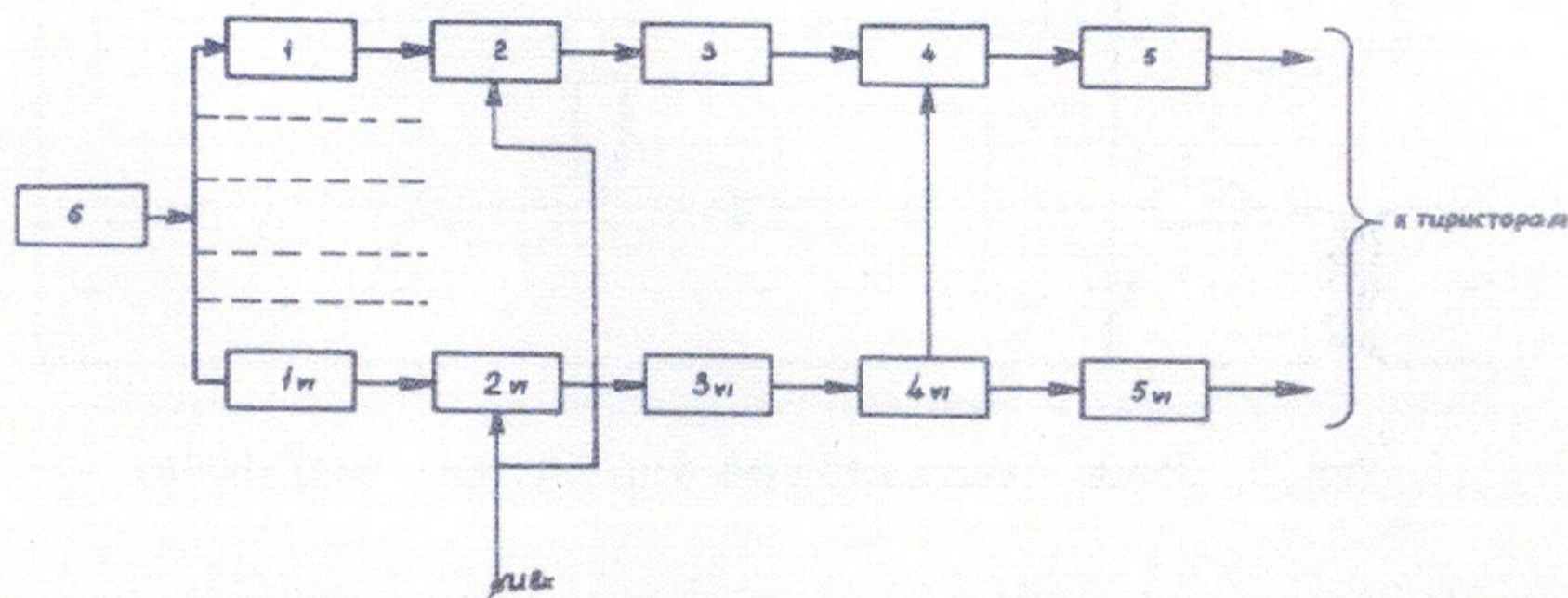


Рис.2. Функциональная схема блока управления.

- 1...1_{У1} - формирователи пилы,
- 2...2_{У1} - нуль-органы,
- 3...3_{У1} - формирователи импульса,
- 4...4_{У1} - логическое устройство,
- 5...5_{У1} - выходные каскады,
6. - схема синхронизации.

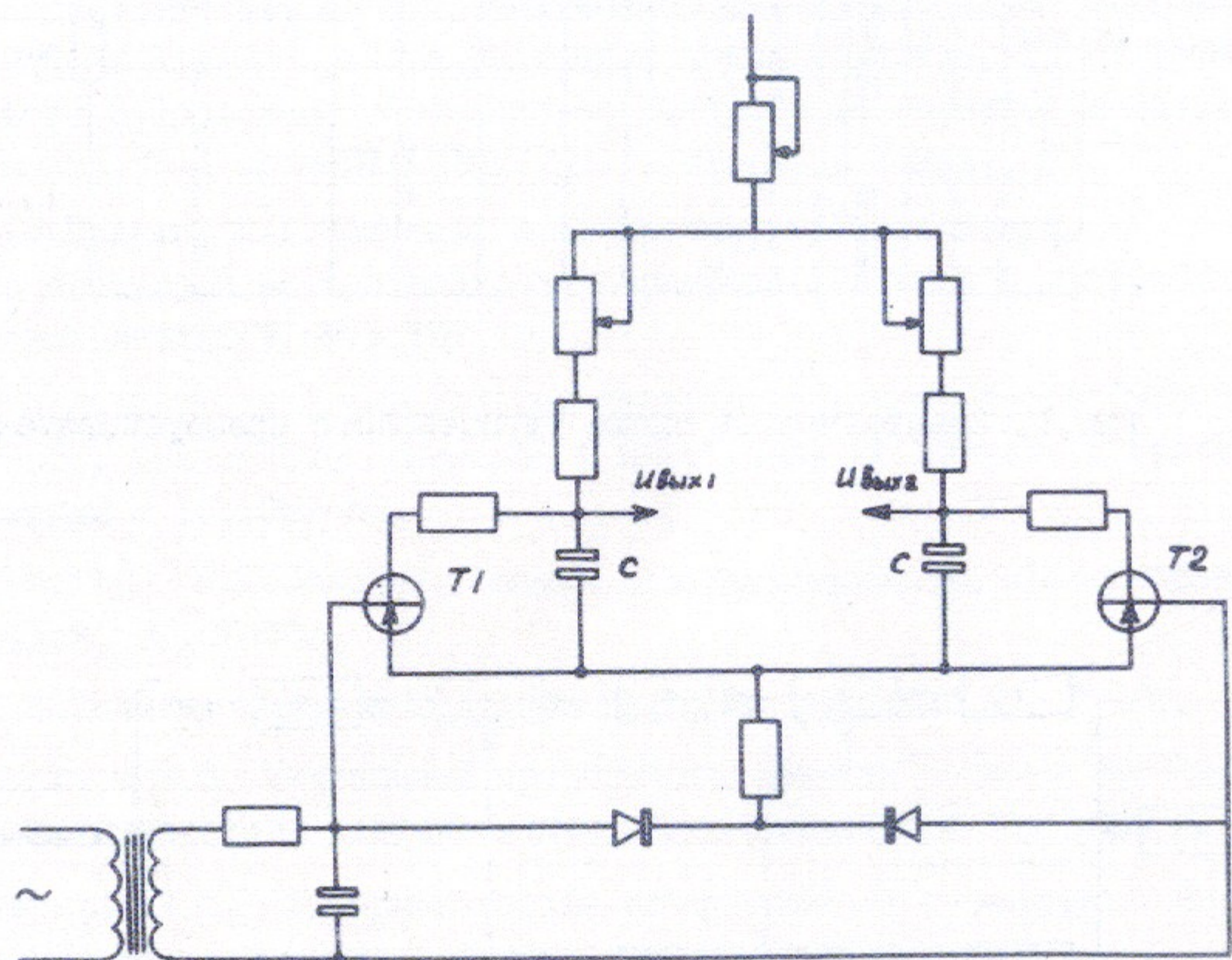


Рис.3. Схема синхронизации управляющих импульсов.

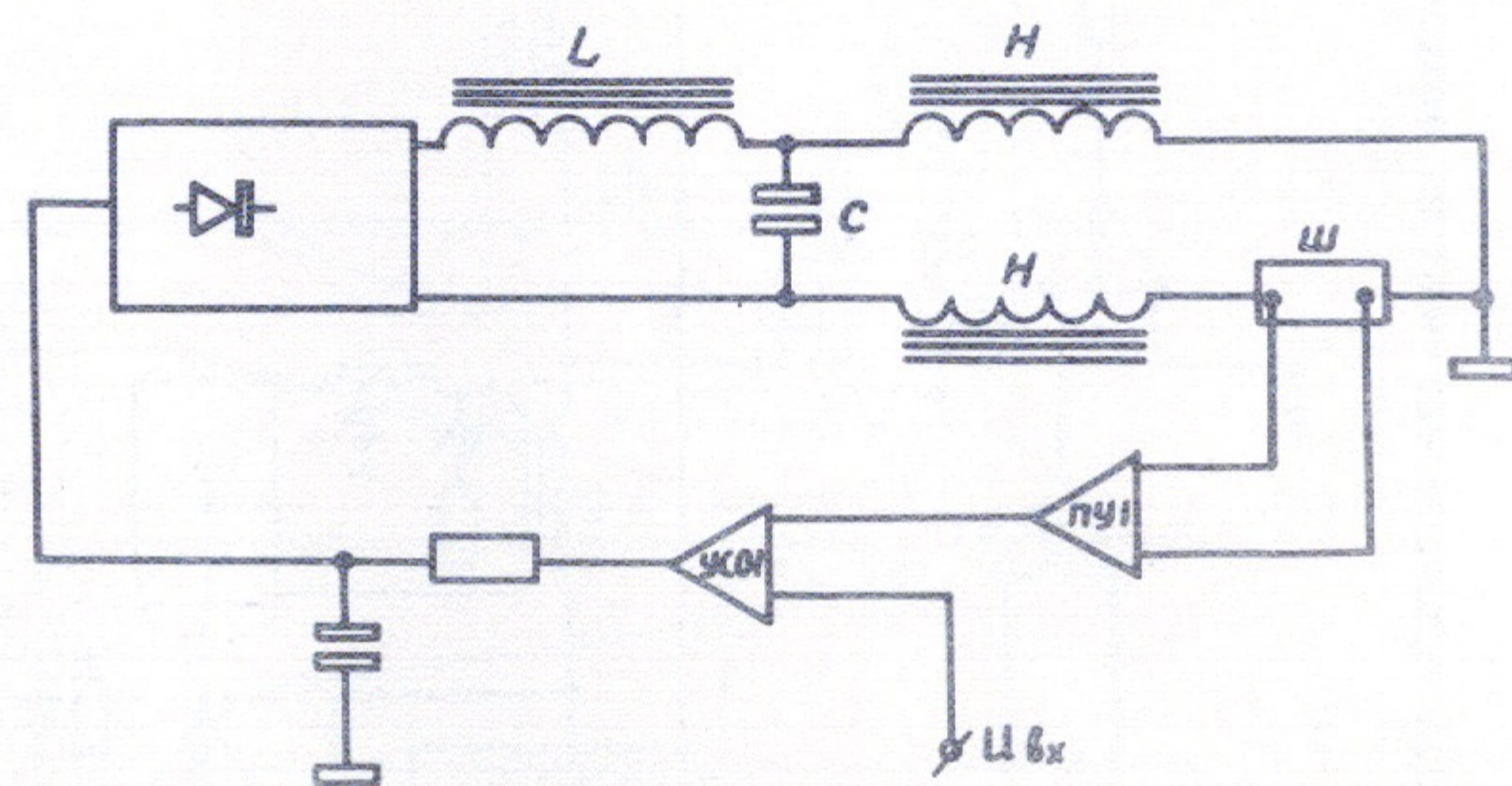


Рис.4. Упрощенная блок-схема системы стабилизации тока.

Рис. 5. Блок-схема системы стабилизации тока.

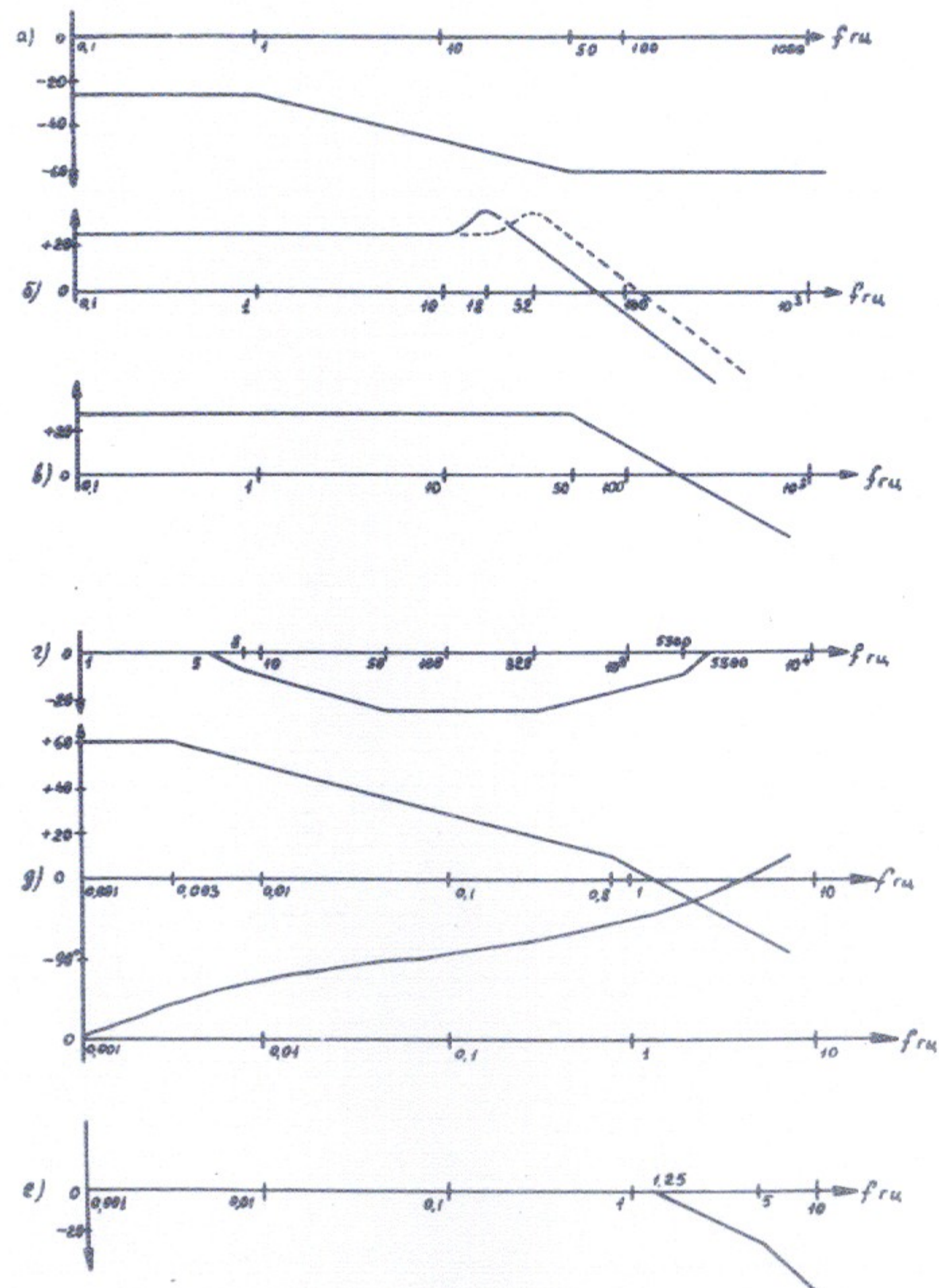
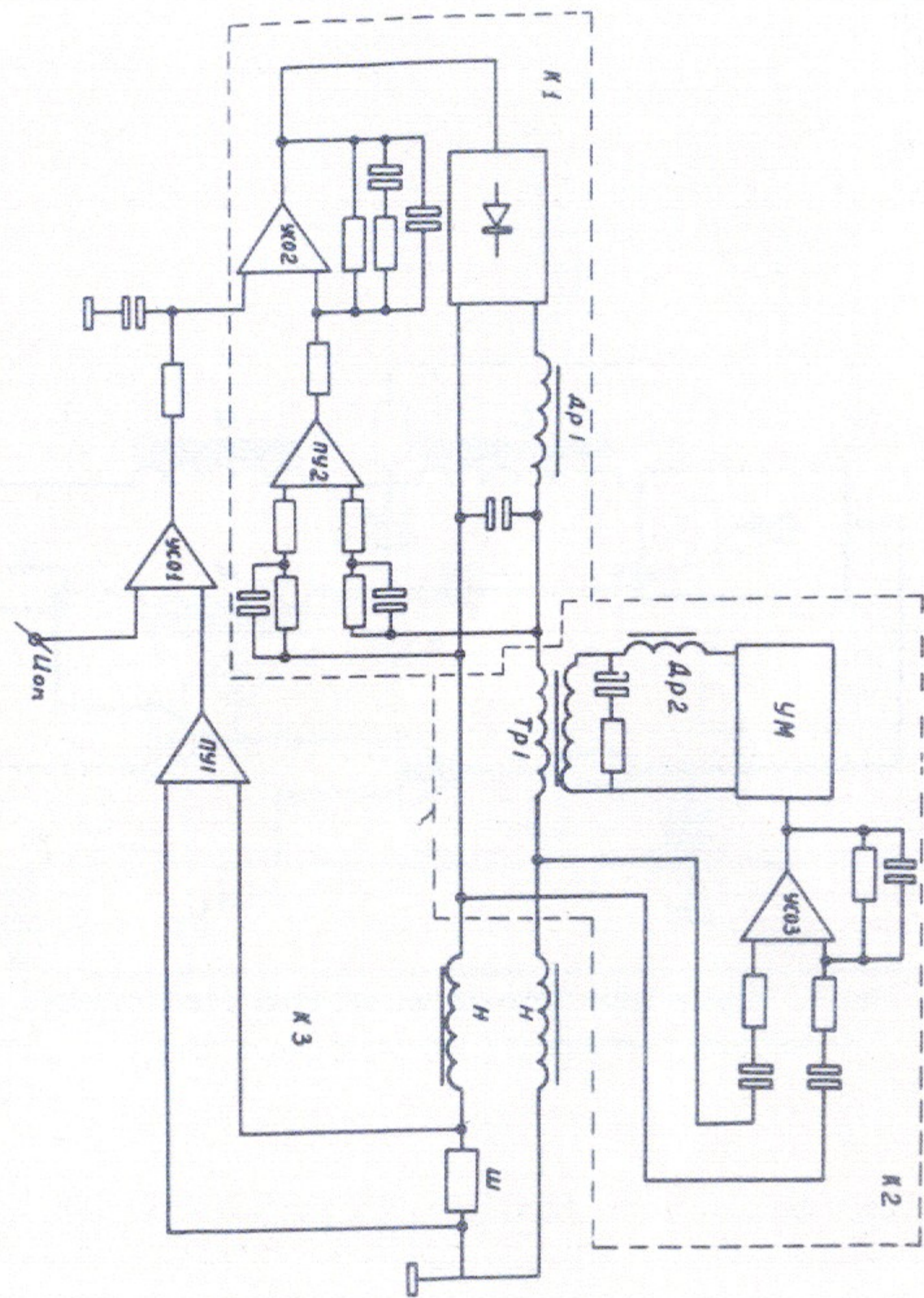


Рис. 6. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) системы стабилизации тока:

- а) ЛАХ электромагнита,
- б) ЛАХ фильтра,
- в) ЛАХ замкнутого контура стабилизации по напряжению,
- г) ЛАХ замкнутого контура подавления пульсаций,
- д) ЛАХ и ФЧХ разомкнутой системы стабилизации тока,
- е) ЛАХ замкнутой системы стабилизации тока.

Ответственный за выпуск С.Н.РОДИОНОВ

Подписано к печати 29.V-1974г. МН 08325

Усл. 0,6 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно

Заказ № 34

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР