

1
В.Ю. Савельева. 1980 год.

Исследование динамики турбогенераторов 800 МВт Сургутской ГРЭС- 2.

Сургутская ГРЭС-2— самая мощная тепловая электростанция в России и крупнейшая в мире, работающая на попутном нефтяном газе (ПНГ)

Исследование выполнено методом Логарифмических Амплитудно-частотных Характеристик (ЛАХ) без решения характеристических уравнений. Работа получила отличную оценку во Всесоюзном Энергетическом Институте (ВЭИ), тогда ещё Советского Союза. Было предложено продолжать более глубокие исследования в этом направлении.

В работе рассматривались вопросы динамики системы возбуждения турбогенератора ТВВ-800 с АРВ-СДП1 изготовления ПО Электросила.

В случае дальнейшей разработки этот метод рекомендовался как добавочный к основному методу исследования с помощью вычислительной машины по методике ВЭИ.

Метод даёт возможность персоналу и возможным исследователям, пользующихся другими методами, легче представить себе физическую сущность процессов и разработать математическую модель системы.

Примечание 2026 года: **Турбогенератор ТВВ-800** с автоматическим регулятором возбуждения сильного действия **АРВ-СДП1** производства производственного объединения «**Электросила**» (сейчас входит в состав АО «Силовые машины») — это классический сверхмощный энергетический комплекс. Именно такие агрегаты составляют основу советских энергоблоков мощностью 800 МВт, в том числе на Сургутской ГРЭС-2, где они активно модернизируются

Аннотация Введение

2

В настоящей работе рассматриваются вопросы динамики системы возбуждения турбогенератора ТВВ-800 (с АРВ-СДП-1) изготовленные ИО "Электросила".
Прямое допущение, что турбогенератор работает на систему неограниченной мощности.

Рассматриваются вопросы:

1. статической устойчивости системы регулирования при малых возмущениях;
2. динамической устойчивости системы регулирования при больших возмущениях;
3. Устойчивости системы регулирования при работе в энергосистеме.

Анализ проводится с помощью:
- структурной схемы, в которой отражены математически заданные связи между отдельными звеньями системы регулирования с помощью передаточных функций этих звеньев;

- логарифмических амплитудно-частотных характеристик системы регулирования без решения характеристических уравнений.

7.8.1. Заключительный внутренний контур
регулирования возбудителя турбогене-
ратора

7.8.2. Контур регулирования напряжения.

8. Анализ устойчивости системы ре-
гулирования

8.1. Статическая устойчивость

8.2. Динамическая устойчивость

8.3. Устойчивость при работе в энерго-
системе.

9. Использованная литература.

Содержание

4

Аннотация

1. Введение
2. Исходные данные
3. Требования к системе возбуждения синхронных генераторов
4. Параметры системы
5. Система базовых единиц
6. Параметры исходного режима
7. Структурная схема системы регулирования и этапы её преобразования.
 - 7.1. Структурная схема турбогенератора
 - 7.1.1. Передаточная функция звена $G_{0B}(p)$
 - 7.1.2. Передаточная функция звена $G_5(p)$
 - 7.1.3. Передаточная функция звена $G_6(p)$
 - 7.1.4. Вычисление коэф-ов структурной схемы турбогенератора
 - 7.1.5. Преобразование структурной схемы турбогенератора
 - 7.2. Структурная схема БУ (блока усиления)
 - 7.3. Структурная схема блока тока (БТ)
 - 7.4. Передаточная функция тиристорного преобразователя
 - 7.5. Структурная схема блока задания по частоте (БЧЗ)
 - 7.6. Структурная схема блока напряжения (БН)
 - 7.7. Датчик реактивного тока
 - 7.8. Преобразование общей структурной схемы системы регулирования.

1. Введение

5

В настоящее время персонал, обслуживающий систему возбуждения турбогенераторов в своей работе руководствуется эксплуатационно-технической документацией, выпущенной заводом-изготовителем (см. п. 2)

В этих материалах дается описание работы отдельных узлов системы возбуждения, но отсутствует структурная схема системы регулирования. Это затрудняет сознательный и качественный анализ системы возбуждения турбогенератора в конкретных условиях эксплуатации э. станций.

В данной работе на основании исходных данных (см. разд. 2) и [12] приведены структурные схемы, отражающие математически существующие связи ме-

ду отуловными звеньями системы регулирования с помощью передаточных функций этих звеньев.

Выбор коэффициентов усиления по каналу регулятора возбуждения для обеспечения устойчивой работы в процессе наладки осуществляется в основном по рекомендациям ВЭИ, МЭИ, Союзтехэнерго и других организаций. Из-за отсутствия экспериментальных методов оценки влияния коэффициентов усиления на работу генераторов в конкретных условиях системы выбор их при проведении наладочных работ является не всегда оптимальным и в процессе эксплуатации не корректируется.

Пути соответствующих преобразований структурной схемы возможен качественный и количественный анализ любых возмущений, поступающих в систему регулирования как при малых, так и при больших возмущениях.

Структурная схема также дает возможность комплексной оценки влияния различных каналов системы регулирования на устойчивость при малых возмущениях.

2. Исходные данные.

7

В данной работе за основу
взяты следующие материалы:

2.1. Материалы завода-изготовителя (по "Электросила")

- Система тиристорного независи-
мого возбуждения типа СТН-640-4200
(Техническое описание и инструкция по
эксплуатации);
- Автоматический регулятор возбуж-
дения АРВ-СДП1 (Техническое описание);
- Паспорт на турбогенератор типа
ТВВ-800-243;
- Комплект схем.

2.2. Технический отчет по наладке тиристорной системы возбуждения турбогенератора ТВВ-800 Сургутской ГРЭС-2 ("Уралтехэнерго")

3. Требования к системе возбуждения синхронных генераторов.

8

Требования, предъявляемые к системе возбуждения синхронных генераторов определяются "Правилами устройства электроустановок" (ПУЭ), "Правилами технической эксплуатации" (ПТЭ), ГОСТ 21558-76, техническими условиями (ТУ) на конкретную систему возбуждения.

Ниже приведены основные требования, предъявляемые к современной системе возбуждения

3.1 Общие требования

Система возбуждения должна обеспечивать все возможные режимы генераторов: холостное возбуждение, работу на холостом ходу и под нагрузкой, обеспечивая необходимые перегрузки, форсировку возбуждения, развозбуждение. Если генератор отключен от сети, система возбуждения должна обеспечивать в случае необходимости быстрое включение генератора в сеть.

АРВ должны поддерживать заданный уровень напряжения на шинах синхронной машины или на шинах станции, демпфировать колебания синхронных машин в последовательных

решениях, повышать статическую и динамическую устойчивость синхронных машин.

АРВ синхронных генераторов должны повышать пропускную способность и устойчивость функционирования электроперехода за счет поддержания постоянного напряжения на шинах генератора и уменьшения его реактивной мощности.

3.2. При работе генератора в сети или на холостом ходу должна быть обеспечена устойчивая работа системы возбуждения в пределах от 0,5 до 1,1 номинального возбуждения генератора.

3.3. Эксплуатационные

Парасистемные системы возбуждения должны обеспечивать нарастание напряжения от 1,05 н.н. до 1,9 н.н. за время не более 0,08 с.

По ГОСТ 21558-76 двукратная перегрузка возбуждения должна обеспечиваться при понижении напряжения прямой последовательности на выводах генератора до 0,8 н.н.

3.4. Точность регулирования.

Система возбуждения с АРВ должна обеспечивать:

— точность поддержания напряжения прямой последовательности не бо-

не 1,0%,

- точность поддержания напряжения прямой последовательности при кратковременных изменениях частоты напряжения синхронной машины от $+100\%$ до минус $20\% f_n$ ~~$\pm 10\%$~~ $\pm 20\%$

- диапазон изменения уставок от 0,8 до 1,1 Uном при скорости изменения уставки 0,3 ... 0,4% номинального напряжения в секунду;

- точность автоматической подстройки уставки напряжения турбогенератора к напряжению сети $\pm 0,5\%$ от номинального напряжения синхронной машины.

3.5. Стабильность.

Стабильность напряжения на шинах станции при компенсации реактивного сопротивления повышающего трансформатора - 2...5% при снижении по уровню напряжения турбогенератора до минус 2%

4. Параметры системы.

4.1. Турбогенератор

- Тип	TBB-800-293
- Активная мощность (P)	800000 кВт
- Полная мощность (S)	889000 кВА
- Номинальное напряжение (U _н)	24000 В
- Номинальный ток статора (I _н)	21400 А
- Номинальная частота вращения (n _н)	3000 об/мин
$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$	314 рад/с
- Номинальная частота сети (f _н)	50 Гц
- Номинальный ток ротора (I _{рн})	3850 А
- Номинальное напряжение ротора (U _{рн})	600 В
- Коэффициент мощности номинальный (cos φ _н)	0,9
- Момент динамической перегрузки генератора (T _д ²)	14 т.м ²
- Кратность форсировки возбуждения по напряжению и току по отношению к номинальным	2,0 е
- Длительность режима форсировки, не более	15 с
- Скорость нарастания напряжения возбуждения в режиме форсировки, не менее	15 е/с
- Продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление следования фаз (X _d '')	21,9%
- Продольное переходное индуктивное сопротивление следования фаз (X _d ')	30,7%
- Продольное синхронное индуктивное сопротивление (X _d)	2,33

12
- Поперечное суммарное индуктивное
сопротивление (X_d)

2,33

- Постоянная времени обмотки
возбуждения при разомкнутой
статорной обмотке (T_{d_0}')

9,3с

- Момент динамический шерфы
турбины

$83,8 \cdot 10^3 \text{ Н.м.с}^2$

- Индуктивное сопротивление
сети (X_e)

0,4 о.е.

$G \cdot D^2$ возбудителя

$4,3 \cdot 10^3 \text{ кг.м}^2$

?

5. Система базовых величин.

5.1. Треугольная мощность

$$S_{3\phi} = S_H = 889 \cdot 10^6 \text{ ВА}$$

5.2. Мощность на фазу

$$S_{\phi} = \frac{S_{3\phi}}{3} = \frac{889}{3} \cdot 10^6 = 296 \cdot 10^6 \text{ ВА}$$

5.3. Напряжение статора

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{24 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 13,87 \cdot 10^3 \text{ В}$$

5.4. Время

$$t_{\phi} = 1/\omega_H = 1/314 = 3,18 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

5.5. Ток статора

$$I_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{296 \cdot 10^6}{13,87 \cdot 10^3} = 21,4 \cdot 10^3 \text{ А}$$

5.6. Сопротивление статора

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{13,87 \cdot 10^3}{21,4 \cdot 10^3} = 0,648 \text{ Ом}$$

5.7. Потокосцепление статора

$$\Psi_{\phi} = U_{\phi} \cdot t_{\phi} = 13,87 \cdot 10^3 \cdot 3,18 \cdot 10^{-3} = 44,1 \text{ Вб}$$

5.8. Индуктивность статора

$$L_{\phi} = \frac{\Psi_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{44,1}{21,4 \cdot 10^3} = 2,06 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

5.9. Мощность ротора

$$S_{\phi r} = S_{\phi} = 296 \cdot 10^6 \text{ ВА}$$

5.10. Базовый ток возбуждения

Получаемая методикой, изложенной в [11]

$$I_{\phi 0} = \frac{I_{\phi}}{K_f}$$

Ток возбуждения при номинальном напряжении ТГ (по прямойной характеристике холостого хода)

$$I_{\phi \text{спрям.}} = 1230 \text{ А}$$

Взамоиндуктивность обмотки возбуждения и статорной обмотки при ном. напряжении

$$M_f = \frac{U_H \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot I_{\phi \text{спрям.}} \cdot \omega_{\text{ном}}} = \frac{24 \cdot 10^3 \cdot 1,41}{1,73 \cdot 1230 \cdot 314} = 50,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Индуктивность намагничивания по короткой
оси $L_{md} = L_d - L_{dd}$

Индуктивностью рассеяния L_{dd} пренебрегаем
в относительных единицах

$$L_{md*} = L_{d*} = X_{d*} = 2,330.e$$

$$\text{Следовательно, } L_{md} = L_{md*} \cdot L_{\delta} = 2,33 \cdot 2,26 \cdot 10^{-3} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Коэффициент связи между базовыми величинами
статора и ротора

$$K_f = \frac{\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} M_f}{L_{md}} = \frac{1,73 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{1,41 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3}} = 12$$

Базовый ток возбуждения

$$I_{\delta 0} = \frac{I_{\delta}}{K_f} = \frac{21,4 \cdot 10^3}{12} = 1780 \text{ А}$$

5.11. Напряжение возбуждения

$$U_{f\delta} = \frac{S_{\delta}}{I_{\delta 0}} = \frac{296 \cdot 10^6}{1780} = 166 \cdot 10^3 \text{ В}$$

5.12. Сопротивление обмотки возбуждения

$$R_{f\delta} = \frac{U_{f\delta}}{I_{\delta 0}} = \frac{166 \cdot 10^3}{1780} = 93,2 \text{ Ом}$$

5.13. Потери в обмотке ротора

$$\Psi_{f\delta} = U_{f\delta} \cdot I_{\delta 0} = 166 \cdot 10^3 \cdot 3,18 \cdot 10^{-3} = 527,9 \text{ Вб}$$

5.14. Индуктивность ротора

$$L_{f\delta} = \Psi_{f\delta} / I_{\delta 0} = \frac{527,9}{1780} = 0,296 \text{ Гн}$$

5.15. Взаимная индуктивность ротора и статора

$$M_{f\delta} = \sqrt{L_{\delta} \cdot L_{f\delta}} = \sqrt{0,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,296} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

А что L_{md} в $5,10$?

6. Параметры исходного режима

6.1. Режим работы с номинальной мощностью. Считаем, что генератор работает на шину бесконечной мощности. Все величины в относительных единицах (индекс * опущен)

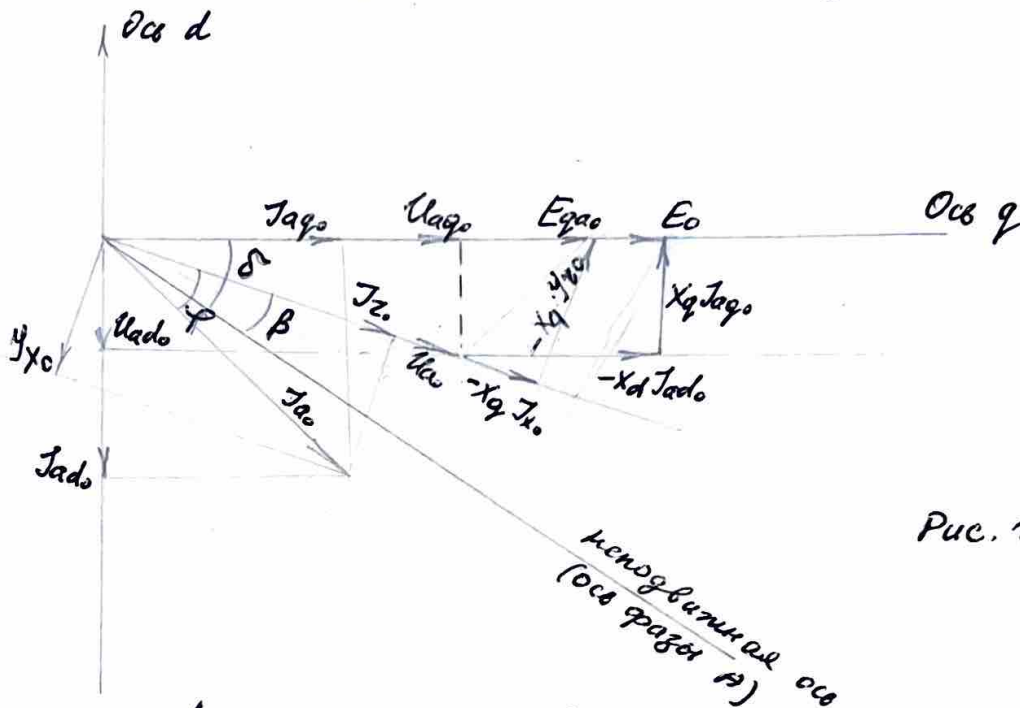


Рис. 1

Активным сопротивлением статора пренебрегаем.

6.1.1 Активный ток генератора

$$I_{a0} = I_H = 1$$

6.1.2 Полный ток генератора

$$I_{a0} = \frac{1}{\cos \varphi_H} = \frac{1}{0,9} = 1,11$$

6.1.3 Угол между вектором напряжения на шинах ТГ (U_a) и полным током (I_a)

$$\varphi_0 = \arccos 0,9 = -25^\circ \text{ (опережающий)}$$

6.1.4 Реактивный ток генератора

$$I_{x0} = I_{a0} \sin \varphi_0 = 1,11 \sin (-25^\circ) = 1,11 (-0,42) = -0,47$$

6.1.5 Угол между осью q и напряжением на шинах генератора ($\delta - \beta$). δ - угол между осью q и неподвижной осью, β - угол между вектором напряжения и неподвижной осью.

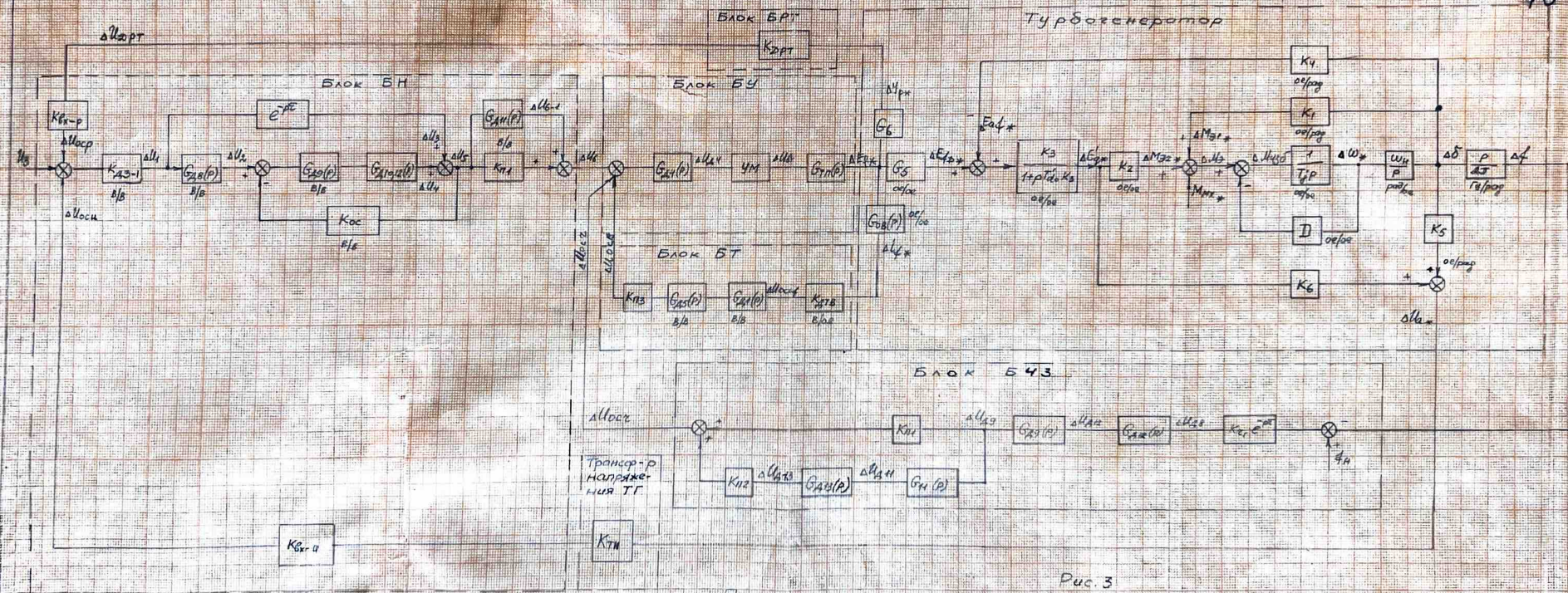


Рис. 3

Общая структурная схема системы регулирования.

$$(\delta - \beta)_0 = \arctg \frac{x_q \cdot I_{20}}{U_{a0} - x_q \cdot I_{20}} = \arctg \left(\frac{-2,33 \cdot 1}{1 - (-2,33 \cdot 0,47)} \right) = \arctg (-1,11) = -47,5^\circ$$

(угол в сторону отставания)

6.1.6. Тогда, на который I_a отстает от оси q

$$(\delta - \beta)_0 + \varphi_0 = -47,5^\circ - 25^\circ = -72,5^\circ$$

6.1.7. Составляющие тока I_a по осям d и q

$$I_{aq0} = I_{a0} \cdot \cos(\delta - \beta + \varphi)_0 = 1,11 \cdot \cos(-72,5^\circ) = 1,11 \cdot 0,3 = 0,33$$

$$I_{ad0} = I_{a0} \sin(\delta - \beta + \varphi)_0 = 1,11 \cdot \sin(-72,5^\circ) = 1,11 \cdot 0,95 = -1,05$$

6.1.8. Составляющие напряжения U_a по осям d и q

$$U_{aq0} = U_{a0} \cos(\delta - \beta)_0 = 1 \cdot \cos(-47,5^\circ) = 1 \cdot 0,67 = 0,67$$

$$U_{ad0} = U_{a0} \sin(\delta - \beta)_0 = 1 \cdot \sin(-47,5^\circ) = -0,73$$

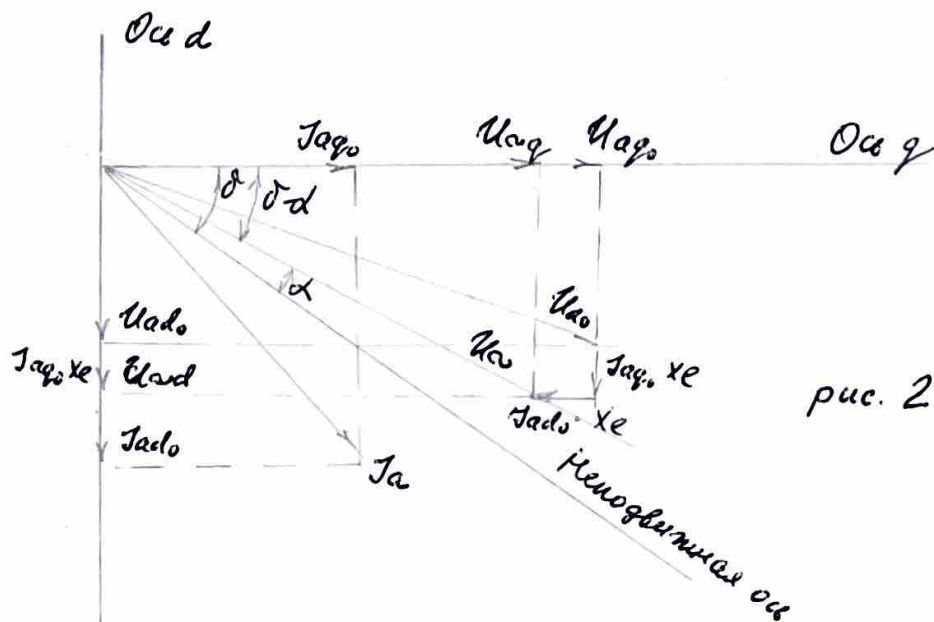
6.1.9. ЭДС статора, соответствующая в установленном режиме ЭДС возбуждения ТГ.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{d0} = \bar{E}_0 &= \bar{U}_{aq0} - j x_d I_{ad0} = \\ &= 0,67 - [- (2,33 \cdot 1,04)] = 3,2 \end{aligned}$$

6.1.10 ЭДС ТГ по оси q

$$\begin{aligned} E_{qa0} &= \bar{E}_0 - j(x_d - x_q) I_{ad0} \cdot \text{Поскольку } x_d = x_q \\ E_{qa0} &= E_0 = 3,2 \end{aligned}$$

6.1.11. Напряжение на шинах бесконечной мощности (см. рис. 2)



x_e - сопротивление тр-ра и линии до
иной бесконечной мощности. Активным сопро-
тивлением пренебрегаем. $R_e = 0$ $x_e = 0,4$

$$J_{ad0} \cdot x_e = -1,05 \cdot 0,4 = -0,42$$

$$J_{aq0} \cdot x_e = 0,34 \cdot 0,4 = 0,136$$

$$U_{aq} = U_{aq0} + J_{ad0} x_e = 0,67 + (-0,42) = 0,25$$

$$U_{ad} = U_{ad0} + J_{aq0} x_e = -0,73 + 0,136 = -0,6$$

$$\operatorname{tg}(\delta - \alpha) = \frac{U_{ad}}{U_{aq}} = -\frac{0,6}{0,25} = -2,4 \quad (\delta - \alpha) = -67,3$$

$$U_{\omega} = \sqrt{U_{aq}^2 + U_{ad}^2} = \sqrt{(0,25)^2 + (0,6)^2} = 0,65$$

$$|\sin(\delta - \alpha)| = \sin 67,3 = 0,92$$

$$\cos(\delta - \alpha) = \cos 67,3 = 0,39$$

6.2. Ренши холостого хода

$$J_{\tau 0} = J_H = 0$$

$$U_{ad} = 0$$

$$U_{aq0} = 1$$

$$U_{ad} = 0$$

$$J_{a0} = 0$$

$$\operatorname{tg}(\delta - \alpha) = 0$$

$$U_{ad0} = 0$$

$$\operatorname{tg}(\delta - \alpha) = 0$$

$$J_{x0} = 0$$

$$U_{\omega} = 1$$

$$E_{d0} = 1$$

$$U_{\omega} = 1$$

$$(\delta - \beta)_0 = 0$$

$$(\delta - \beta) + \rho_0 = 0$$

$$E_{q0} = 1$$

$$U_{aq} = 1$$

$$J_{aq0} = 0$$

$$U_{aq} = 1$$

$$J_{ad0} = 0$$

$$J_{aq0} = 0$$

$$\sin(\delta - \alpha) = 0 \quad \cos(\delta - \alpha) = 1$$

7. Структурная схема системы регу-

19

лирования и этапов её преобразования

Общая структурная схема системы регулирования показана на рис. 3

Схема составлена для измерения поведения системы при малых возмущениях, т.е. возмущениях, при которых система остается линейной

Структурные схемы и передаточные функции отдельных её элементов, подробно рассмотренные в разделах 7.1. 7.8.8, составлены на основании следующих материалов:

- Для элементов шкафа регулятора:

- 1) механической документации на автоматический регулятор возбуждения АРВ-СДМ,
- 2) материалов по налаживанию системы автоматического регулирования турбогенератора 800 МВт Сургутской ГРЭС-2.

- Для синхронного генератора - на основании работы Андерсона и Фуада „Управление энергосистемами и устойчивость“ М. Энергия, 1980г [11]

4.1 Структурная схема турбогенератора 20

Структурная схема турбогенератора в режиме нагрузки изображена на рис. 4. В основу взета линеаризованная система уравнений [11]:

$$\begin{cases} \Delta E_{q*}' = \frac{k_3}{1+k_3 T_{d0} p} \Delta E_{fd*}' - \frac{k_3 k_4}{1+k_3 T_{d0} p} \Delta \delta \\ \Delta M_{z*} = k_1 \Delta \delta + k_2 \Delta E_{q*}' \\ \Delta U_{a*} = k_5 \Delta \delta + k_6 \Delta E_{q*}' \\ T_j \frac{d\omega_*}{dt} = M_{z0} \Delta \omega_* \end{cases}$$

Момент отнесен к базовой 3-фазной мощности, $\frac{d}{dt}$ заменено оператором p . Расшифровка обозначений — см. рис. 4.

Основные допущения — неучет насыщения магнитной цепи, асинхронное сопротивление статора и влияние динктерного обмотки, допущение работы на сети неограниченной мощности.

4.1.1. Передаточная функция звена $G_{\omega\delta}(p)$

Выводим из соотношения:

$$E_f = i_f R_v + L_v p i_f$$

R_v и L_v — сопротивление и индуктивность цепи возбуждения.

$$\frac{i_f R_v}{E_f} = \frac{1/R_v}{1 + \frac{L_v}{R_v} p} = \frac{1}{1 + p T_v}$$

$$1 + \frac{L_v}{R_v} p$$

В относительных единицах

$$\frac{i_{f*} T_{d0} R_v * R_{f0}}{E_{f*} U_{f0}} = \frac{1}{1 + p \frac{R_v * R_{f0}}{L_v * L_{f0}}} \quad \frac{1}{1 + p \frac{L_v * L_{f0}}{R_v * R_{f0}}}$$

к рис. 4

$\Delta E_{f*}^{0,e}$ - приращение ЭДС тиристорного возбудителя

$\Delta E_{fd*}^{0,e}$ - приращение ЭДС генератора, сдерживаемый
таким возбуждением Δi_{f*} и соответствует

$$E_{f*}$$

$\Delta E_g^{0,e}$ - приращение переходной ЭДС по оси q ;

ΔM_{1*} ; ΔM_{2a*} ; ΔM_{2*} ; $\Delta M_{12\delta*}$, M_{12*} - моменты
генератора. Относятся к $S_{3\delta}$. Угловому равновесию

$$\Delta P_{1*}; \Delta P_{2a*}; \Delta P_{2*}; \Delta P_{12\delta*}; P_{m*}$$

$\Delta \omega_{*0,e}$ - приращение угловой скорости;

$\Delta \delta_{раг}$ - приращение угла машины;

$\Delta U_{*0,e}$ - приращение разном напряжения
на шинах генератора;

$\Delta f, f_{г}$ - приращение частоты генератора.

δ - коэффициент демпфирования.

$$\frac{I_0 \cdot \frac{J_0}{K_4} \cdot R_{B+} \cdot \frac{S_0}{J_0^2} K_4^2}{E_4 \cdot \frac{S_0 \cdot K_4}{J_0}} =$$

$$\frac{1}{1+p \frac{R_{B+} \cdot K_4^2 \cdot \frac{4\sigma}{J_0}}{L_{B+} \cdot \frac{4\sigma}{J_0} K_4^2 t_0}}$$

Поменяем
числа
и знамен
↑ ↓

$$\frac{I_0 \cdot R_{B+}}{E_4} = \frac{1}{1+p T_0}$$

$$T_0 = \frac{R_{B+}}{L_{B+}} = \frac{R_{B+} \cdot \omega_H}{L_{B+}}$$

$$T_0 = \frac{L}{R}$$

$$G_{0B}(p) = \frac{\Delta I_0}{\Delta E_4} = \frac{1/R_{B+}}{1+p T_0} \frac{0.1}{0.1}$$

Активное сопротивление ротора при 15°C

$$r_{px} = 9122 \text{ Ом}$$

Расчетное сопротивление обмотки ротора

$$r_p = 1,32 \quad r_{px} = 0,16 \text{ Ом}$$

Сопротивление цепи возбуждения

$$R_B = r_p + r_{p00} = 916 + 9032 = 9948 \text{ Ом}$$

$r_{p00} = R_2 + 2 R_6 + R_{kp}$ (сопротивление, эквивалентное коммутационной; 2х фаз возбуждения, проводов)

$$\text{Принимаем } r_{p00} = 0,2 r_p = 0,2 \cdot 0,16 = 0,032 \text{ Ом}$$

$$\frac{1}{R_{B+}} = \frac{1 \cdot R_0}{R_B} = \frac{93,2}{9948} = 0,00937$$

Индуктивность цепи возбуждения, принимаем

$$L_B = L_p = r_{px} \cdot T_{d0} = 0,122 \cdot 9,3 = 1,13 \text{ Гн}$$

Постоянные времени цепи возбуждения (при разомкнутой обмотке статора)

$$T_0 = \frac{L_B}{R_B} = \frac{1,13}{9948} = 0,000113 \text{ с}$$

$$G_{0B}(p) = \frac{0,00937}{1+p \cdot 0,000113}$$

4.1.2. Передаточная функция звена G_5 24

Определяем из [11]

E_{fd} - эквивалентная ЭДС статора, соответствующая току ротора i_f при разомкнутой обмотке статора в установленном режиме

$$\frac{E_{fd*}}{E_{fn*}} = \frac{\sqrt{3} E_{fDe}}{E_{fn*}} = \frac{3,2 \cdot 166 \cdot 10^3 \cdot 1,73}{600} = 1540$$

E_{fDo} - см 6.9

4.1.3. Передаточная функция звена G_6

Согласно [14]

$$\frac{\Delta i_p(p)}{\Delta i_v(p)} = K_{ср} \frac{T_{kd}p+1}{T_c'p+1}$$

i_p - реактивный ток

i_v - ток возбуждения

T_{kd} и T_c' - постоянные времени ^{не учитываем} двигателя обмоток (отсутствуют)

$$K_{ср} = \frac{I_{рн}}{i_{вн0} - i_{в0}}$$

$I_{рн}$ - реактивный ток, равный номинальному

$i_{в0}$ - ток возбуждения при х. ходе ($\cos \varphi = 0, I_a = 0, I_p = 0$)

$i_{вн0}$ - ток возбуждения при $\cos \varphi = 0, I_a = 0, I_p = I_n$

$i_{вн0}$ определяем из диаграммы рис 5,

$$i_{вн0} = 4440 \text{ А.}$$

В относительных единицах

$$G_6 = \frac{\Delta I_{p*}}{\Delta i_{f*}} = \frac{I_{рн} \cdot I_{ф}}{I_{ф} \cdot (i_{вн0} - i_{в0})} = \frac{1780}{4440 - 1400} = 0,59 \frac{\text{о.е.}}{\text{о.е.}}$$

$U_{\text{фн.о}} = 1000 \text{ В}$
 $\cos \varphi = 0.8$

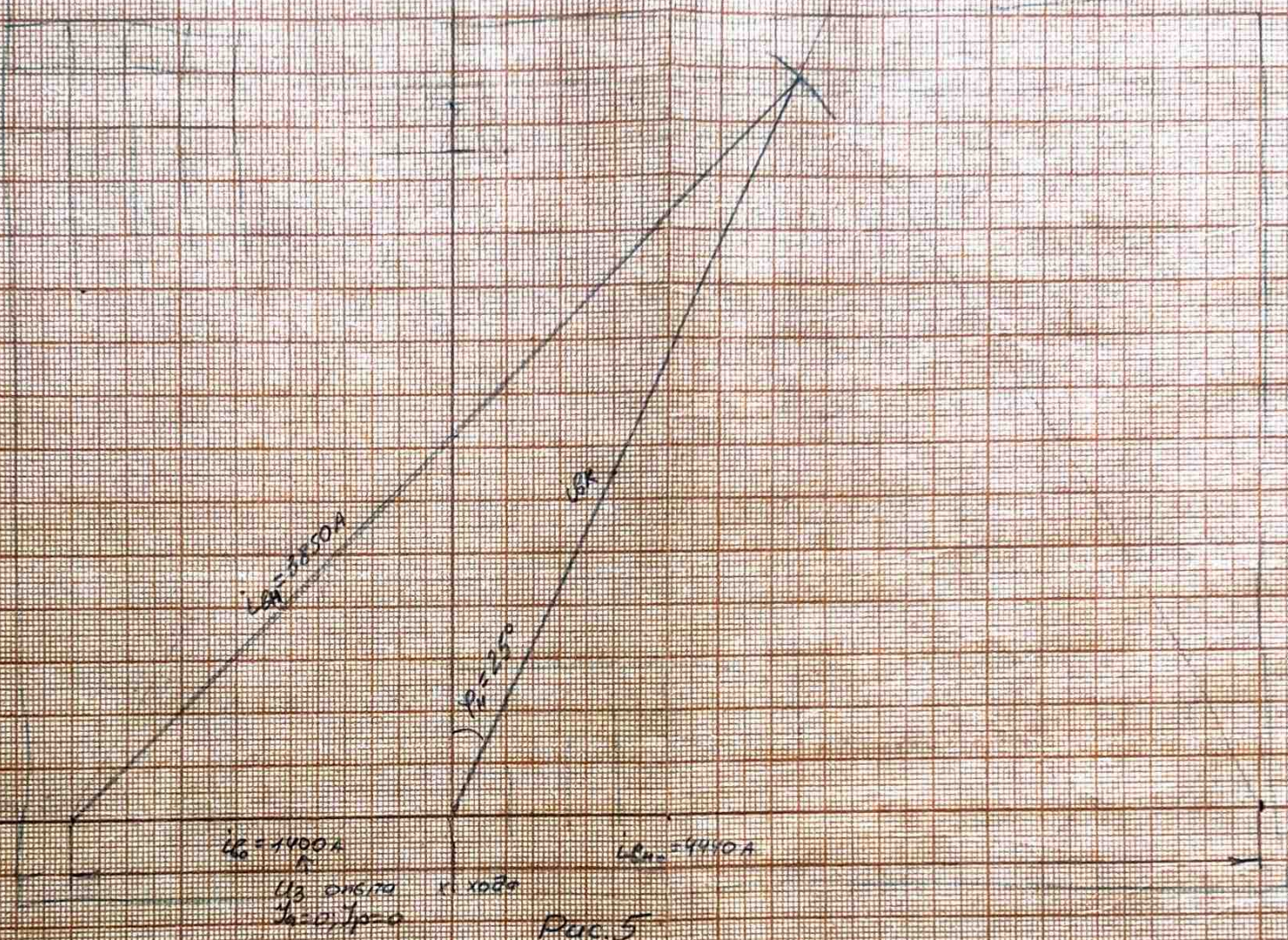


Рис. 5

Векторная диаграмма для определения
 тока возбуждения ($I_{\text{в.о}}$) при $I_{\text{а}} = 0, I_{\text{р}} = I_{\text{а}}$ и $\cos \varphi = 0$

4.1.4 Выхисленные координатной структуры ной схемы. [М, разд. 6.5]

Решим номинальной нагрузки
Во всех формулах считаем, что $R_e = 0$

$$\frac{1}{K_0} = R_e^2 + (x_q + x_e)(x_d' + x_e) = 0 + (2,33 + 0,4)(0,307 + 0,4) = 1,93$$

$$K_0 = 0,51$$

K_1 — изменение э. момента при малом изменении угла ротора и постоянства токосцепления по оси d , т.е. синхронизирующий момент

$$K_1 = \left(\frac{\Delta M_{2\pi}}{\Delta \delta} \right)_{E_q' = E_q'} = K_0 \cdot U_\infty \left\{ E_{q0} [R_e / \sin(\delta - \alpha)] + \right. \\ \left. + (x_d' + x_e) \cos(\delta - \alpha) \right\} + I_{aq0} (x_q - x_d') [(x_q + x_e) / \sin(\delta - \alpha) \cdot \\ \cdot (-R_e \cos(\delta - \alpha))] \} = 0,51 \cdot 0,65 [3,2 (0,307 + 0,4) \cdot 0,39 + \\ + 0,34 (2,33 - 0,307) (2,33 + 0,4) \cdot 0,32] = 0,33 [0,85 + 1,72] = 0,85$$

K_2 — изменение э. момента при малом изменении токосцепления по оси d и постоянстве угла ротора

$$K_2 = \left(\frac{\Delta M_{2\pi}}{\Delta E_{q' \pi}} \right)_{\delta = \delta_0} = K_0 \left\{ I_{aq0} [R_e^2 + (x_q + x_e)^2] + E_{ad0} \cdot R_e \right\} = \\ = 0,51 \cdot 0,34 \cdot (2,33 + 0,4)^2 = 1,29$$

K_3 — отражает влияние внешнего короткого замыкания, от нагрузки не зависит.

$$K_3 = \frac{1}{1 + K_0 (x_d - x_d') (x_q + x_e)} = \frac{1}{1 + 0,51 (2,33 - 0,307) (2,33 + 0,4)} = 0,26$$

27
 K_4 - охранный размагничивающее действие реакции якоря при изменении угла ротора

$$K_4 = \left(\frac{1}{K_3} \cdot \frac{E'_q}{\Delta \delta} \right)_{E'_q = E_{q0}} = U_{q0} K_0 (x_d - x'_d) \left[(x_q + x_e) / \sin(\delta - \alpha) / - \right. \\ \left. - R_e \cos(\delta - \alpha) \right] = 0,65 \cdot 0,51 (2,33 - 0,307) (2,33 + 0,4) \cdot 0,92 = 1,68$$

K_5 - изменение напряжения на шинах генератора U_a при малом изменении угла ротора при постоянстве потокоцепления по оси d:

$$K_5 = \left(\frac{\Delta U_{a+}}{\Delta \delta} \right)_{E'_q = E'_{q0}} = \int (K_0 U_{q0} x'_d U_{a0} / U_{q0}) \left[R_e \cos(\delta - \alpha) - \right. \\ \left. - (x_q + x_e) / \sin(\delta - \alpha) \right] - (K_0 U_{q0} x_q U_{a0} / U_{q0}) \left[(x'_d + x_e) \cos(\delta - \alpha) + \right. \\ \left. + R_e \sin(\delta - \alpha) \right] \Bigg| = \frac{0,51 \cdot 0,65 \cdot 0,307 \cdot 0,67 \left[-(2,33 + 0,4) \cdot 0,92 \right]}{1} - \\ - \frac{0,51 \cdot 0,65 \cdot 2,33 \cdot (-0,73) (0,307 + 0,4) \cdot 0,39}{1} = -0,17 + 0,15 = -0,02$$

K_6 - изменение напряжения на шинах генератора при малом изменении потокоцепления по оси d и постоянстве угла ротора

$$K_6 = \left(\frac{\Delta U_{a+}}{\Delta E'_{q+}} \right)_{\delta = \delta_0} = \frac{U_{a0}}{U_{q0}} \left[1 - K_0 x'_d (x_q + x_e) \right] - \\ - (U_{a0} / U_{q0}) \cdot K_0 x_q R_e = \frac{0,67}{1} \left[1 - 0,51 \cdot 0,307 (2,33 + 0,4) \right] = 0,388$$

$K_0 = 0,51$

$$K_1 = 0,85$$

$$K_4 = 1,68$$

$$K_2 = 1,29$$

$$K_5 = -0,02$$

$$K_3 = 0,26$$

$$K_6 = 0,388$$

Решим холостую ход

$$K_0 = 0,51$$

$$K_1 = 0,51 \cdot 1 [1(0,307 + 0,4) \cdot 1] = 0,36$$

$$K_2 = 0$$

$$K_3 = \frac{1}{1 + 0,51(2,33 - 0,307)/(2,33 + 0,4)} = 0,26$$

$$K_4 = 1 \cdot 0,51(2,33 - 0,307)(2,33 + 0,4) \cdot 0 = 0$$

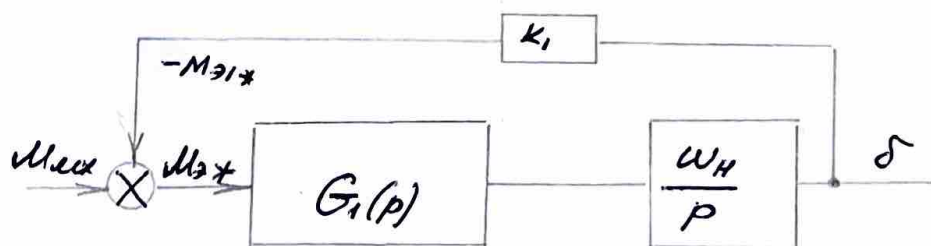
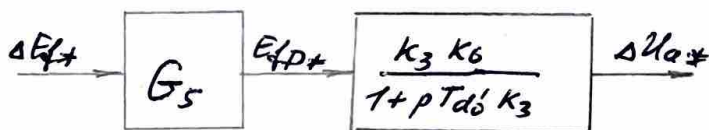
$$K_5 = 0$$

$$K_6 = 1 [1 - 0,51 \cdot 0,307(2,33 + 0,4)] = 0,58$$

$$K_1 = 0,36 \quad K_3 = 0,26 \quad K_5 = 0$$

$$K_2 = 0 \quad K_4 = 0 \quad K_6 = 0,58$$

Поскольку коэффициенты K_2, K_4, K_5 равны нулю, структурная схема турбогенератора в режиме холостого хода приобретает вид:



При $x \cdot x \quad U_{a*} = 1,73$

$$i_{f0} = 1400 \text{ A} \quad E_{f0} = i_{f0} R_f = 1400 \cdot 0,19 = 270 \text{ В}$$

$$G_5 = \frac{E_{fd0*}}{E_{f0*}} = \frac{1,73 \cdot 166 \cdot 10^3}{270} = 1069$$

$$\frac{\Delta U_{a*}}{E_{d*}} = \frac{0,26 \cdot 0,58}{1 + p \cdot 9,3 \cdot 0,26} = \frac{1,5}{1 + p \cdot 2,4}$$

§1.5. Преобразование структурной схемы турбогенератора

Коэффициент $G_1(p) = \frac{\Delta M_{3*}}{\Delta \omega}$, отражающий инерцию

турбогенератора.

Решим нагрузку

$$\frac{\Delta \omega_*}{\Delta M_{3\delta*}} = \frac{1}{p T_j}$$

T_j — постоянная инерции турбоагрегата
В соответствии с [11]

$$T_j = 2H, \text{ где } H = \frac{W_k}{S_{3\delta}}; W_k = \frac{1}{2} J \omega_H^2$$

$$H = \frac{J \omega_H^2}{2 S_{3\delta}}; T_j = \frac{J \omega_H^2}{S_{3\delta}}$$

Момент инерции турбоагрегата

$$J = \frac{J D^2_{\text{инер}} + J D^2_{\text{воз}}}{4} + \sum (m r^2)_{\text{турб}} =$$

$$= \frac{14 \cdot 10^3 + 4,3 \cdot 10^3}{4} + 83,8 \cdot 10^3 = 90 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$T_j = \frac{90 \cdot 10^3 \cdot 314^2}{889 \cdot 10^6} = 10 \text{ с}$$

много

$$G_1(p) = \frac{\Delta \omega_*}{\Delta U_{3*}} = \frac{T_j p}{1 + D \cdot \frac{1}{T_j p}} = \frac{1}{T_j p + D} = \frac{1}{D} \frac{1}{1 + p \frac{T_j}{D}} =$$

$$= \frac{1}{D} \frac{1}{1 + p T_1}, \text{ где}$$

D — коэффициент демультипликации, принимаем $D=2$

$$T_1 = \frac{T_j}{D} = \frac{10}{2} = 5 \text{ с}$$

На рис 6 показано преобразование структурной схемы турбогенератора на участке ΔH_{a*}

ΔE_{d*} . Поскольку нас интересует поведение системы при возмущении на ней системы возмущения, считаем $M_{in} = const$. Передаточные функции $G_1(p)$ и $G_2(p)$ определяем с помощью ЛАЧХ по методике [12] (см. рис 4)

$$G_{3-2}(p) = \frac{\Delta \delta_1}{\Delta E_{d*}} = \frac{G_2}{1 + G_2 H_2}$$

При частотах, когда $G_2 > \frac{1}{H_2} G_{3-2} = \frac{1}{H_2}$
 " " " " " $G_2 < \frac{1}{H_2} G_{3-2} = G_2$

$$G_2 = \frac{K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{s} \cdot \omega_H}{(1 + p T_{d'K_3})(1 + p T_1)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1,29 \cdot 0,26 \cdot \frac{1}{2} \cdot 314}{(1 + p \cdot 9,3 \cdot 0,26)(1 + p \cdot 5)} \cdot \frac{1}{p} =$$

$$= \frac{52,6}{(1 + p \cdot 2,4)(1 + p \cdot 5)} \cdot \frac{1}{p} \text{ ; при } p = 1 \quad K = \frac{52,6}{2,4 \cdot 5} = 4,34$$

$$\frac{1}{H_2} = \frac{1}{K_4} = \frac{1}{1,68} = 0,58$$

Из построения

$$G_{3-2} = 0,58 \cdot \frac{1}{(1 + p \cdot 9,55)^3}$$

$$G_{3-3} = \frac{G_3}{1 + G_3 H_3} ; G_3 = 1$$

$$H_3 = \frac{314 \cdot 0,85 \cdot \frac{1}{2}}{(1 + p \cdot 5)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{133,5}{1 + p \cdot 5} \cdot \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{H_3} = \frac{p(1 + p \cdot 5)}{133,5}$$

$$G_{3-4} = \frac{1}{1 + G_4 H_4} ; G_4 = 1$$

$$H_4 = \frac{\omega_H \cdot K_2 K_3 K_4}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + p T_1} \cdot \frac{1}{1 + p T_{d'K_3}} = \frac{314 \cdot 1,29 \cdot 0,26 \cdot 1,68}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot 5} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot 2,4}$$

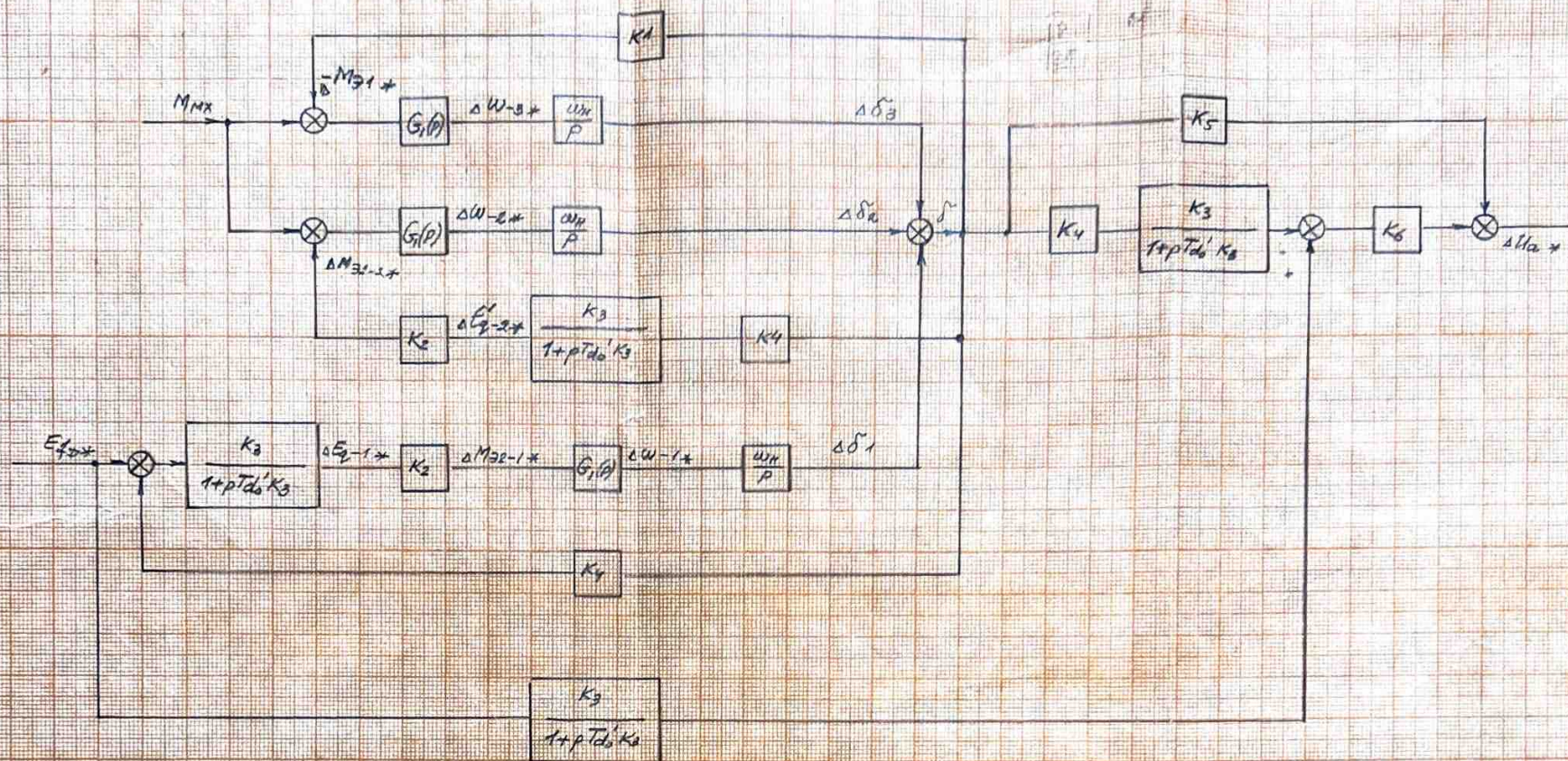
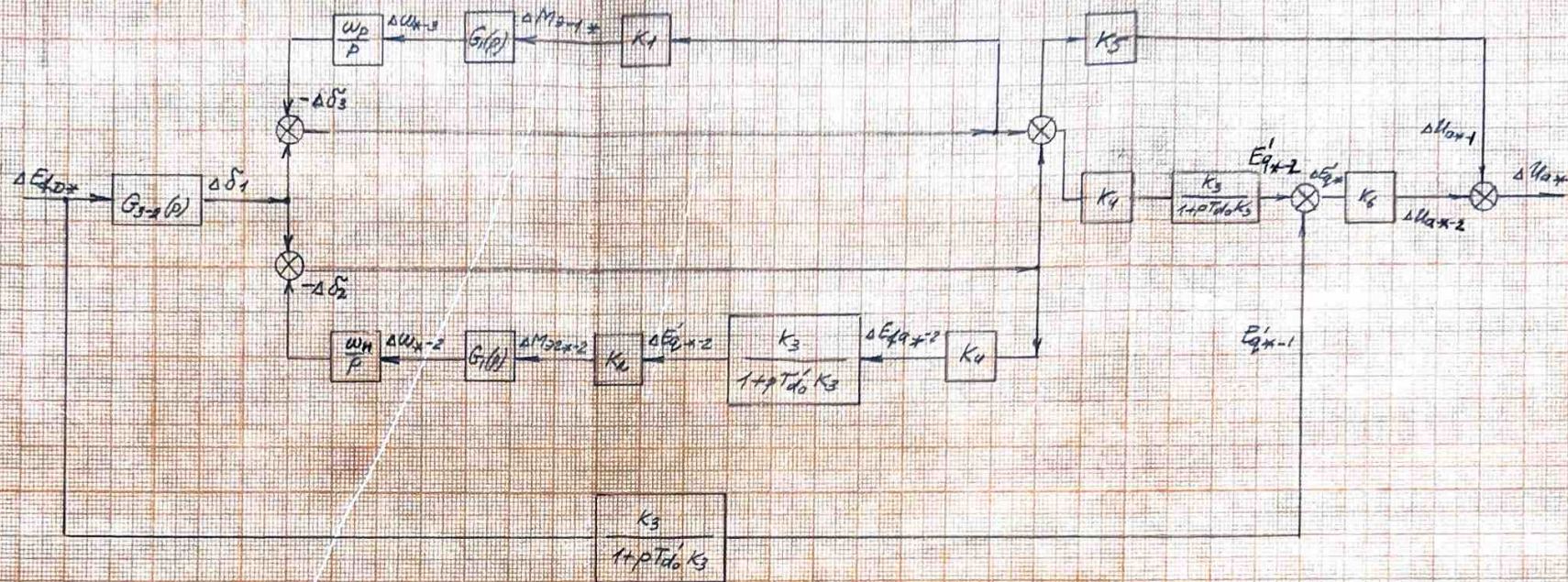
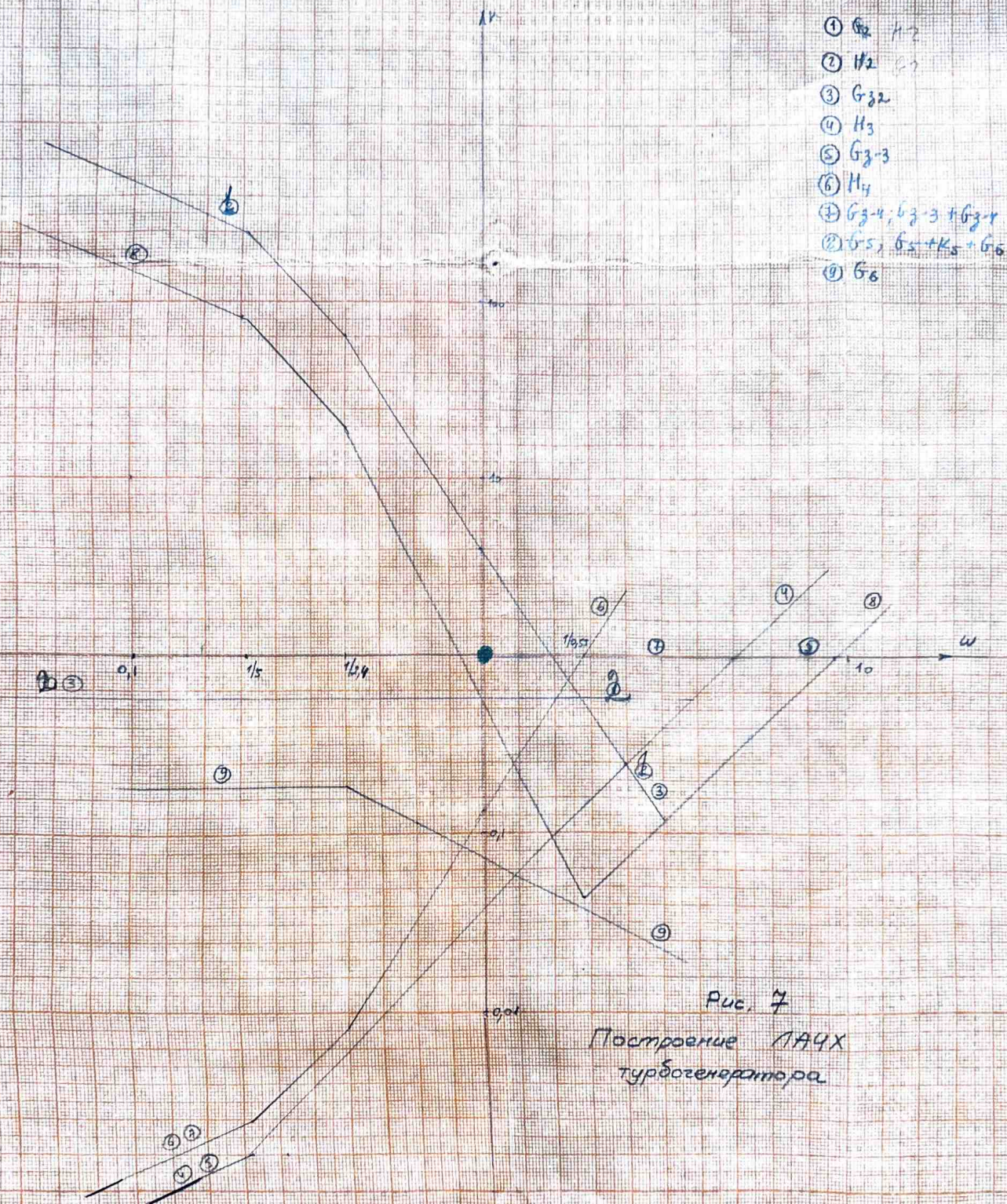


Рис. 6а
Преобразование структурной схемы ТГ в решение нагрузки





$$\frac{1}{H_4} = \frac{2}{314 \cdot 1,29 \cdot 0,26 \cdot 1,68} p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4) =$$

$$= 0,011 \cdot p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)$$

Получаем или не получаем,

$$G_{z-3} + G_{z-4} = G_{z-3} (G_{z-3} > G_{z-4}) \text{ или:}$$

$$G_{z-3} + G_{z-4} = G_{z-4} (G_{z-4} > G_{z-3}) \text{ В результате получаем:}$$

$$G_{z-3} + G_{z-4} = \frac{0,011 \cdot p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)}{(1+p \cdot 0,55)^3}$$

$$G_{r1}(p) = G_{z-2} (G_{z-3} + G_{z-4}) = \frac{0,58 \cdot 0,011 \cdot p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)}{(1+p \cdot 0,55)^6} =$$

$$= \frac{0,00638 p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)}{(1+p \cdot 0,55)^6}, \text{ при } p=1 \text{ } k=0,076$$

$$G_5 = \frac{1}{G_{r1}(p)} \cdot \frac{k_3}{1+pT_{d0}'k_3} \cdot k_6 = \frac{1,68 \cdot 0,26 \cdot 0,388}{1+p \cdot 2,4} = \frac{0,18}{1+p \cdot 2,4} \cdot \frac{1}{G_{r1}(p)}$$

Поскольку $G_5 > G_6 + k_5$, то

$$G_5 - G_6 + k_5 = G_5 = G_{r2}(p)$$

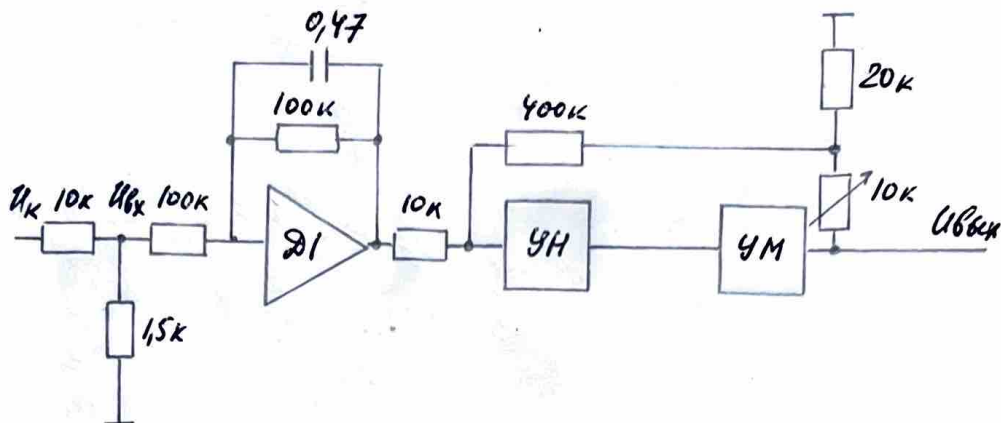
$$G_r(p) = G_{r1}(p) G_{r2}(p) = \frac{k_3 \cdot k_6}{1+pT_{d0}'k_3} = \frac{0,26 \cdot 0,388}{1+p \cdot 2,4} = \frac{0,11}{1+p \cdot 2,4}$$

При определении передаточных функций остаточных звеньев структурной схемой рис.3 получаемое то же же метрикой.

погрешность незначительна

7.2. Структурная схема блока усилителя (БУ) 36

Реальная схема



По данной схеме
по контрольному входу

$$K_{БУ} = \frac{U_{вх}}{U_k} = 7,54$$

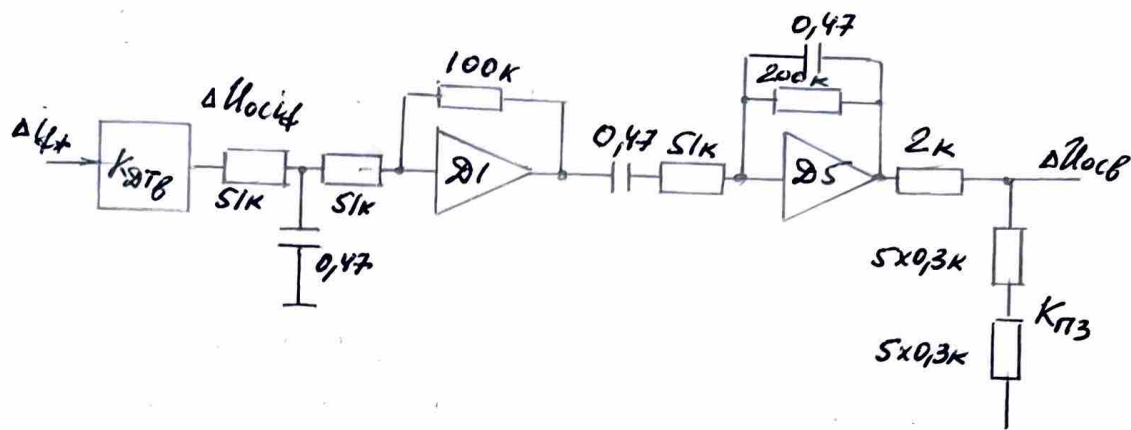
$$\frac{U_{вх}}{U_k} = \frac{7,54 \cdot 1,5}{1,5} = 58$$

$$G_{БУ}(p) = \frac{58}{1 + p \cdot 0,0047}$$

7.3 Структурная схема блока тока (БТ)

37

7.3.1 Реальная схема



7.3.2. По данным таблицы

$$\Delta i_{осiф} = 108 \text{ мкА} \quad \Delta i_x = 3850 \cdot 0,817 \text{ по току}$$

В относительных единицах по постоянному току

$$\Delta i_{x*} = \frac{3850}{1780}$$

$$K_{БТБ} = \frac{\Delta i_{осiф}}{\Delta i_{x*}} = \frac{10,1780}{3850} = 4,62$$

$$7.3.3. G_{21}(p) = \frac{1}{1+pT_{21}}; T_{21} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{51}{2} \cdot 10^3 = 0,012 \text{ с}$$

$$7.3.4. G_{25}(p) = \frac{pT_{25}}{(1+pT_{25-1})(1+pT_{25-2})}$$

$$T_{25} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,094 \text{ с}$$

$$T_{25-1} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 51 \cdot 10^3 = 0,024 \text{ с}$$

$$T_{25-2} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,094 \text{ с}$$

$$7.3.5. K_{ПЗ} = \frac{3}{5} = 0,6 \text{ (Положение переключателя „Тб-10“)}$$

$$7.3.6. G_{БТ}(p) = K_{БТБ} \cdot K_{ПЗ} \cdot G_{25}(p) \cdot G_{21}(p) =$$

$$= \frac{K_{ПЗ} \cdot p \cdot T_{25} \cdot K_{БТБ}}{(1+pT_{21})(1+pT_{25-1})(1+pT_{25-2})} \left[\frac{\text{В}}{\text{О.Е.}} \right]$$

$$K_{ПЗ} \cdot T_{25} \cdot K_{БТБ} = 0,6 \cdot 0,094 \cdot 4,62 = 0,26$$

$$G_{BT}(p) = \frac{0,26 p}{(1+p \cdot 0,012)(1+p \cdot 0,024)(1+p \cdot 0,034)}$$

7.4. Передаточная функция тиристорного преобразователя

По данным завода - изготовителя

$$G_{TH}(p) = K_{TH} \cdot e^{-p\tau} \quad K_{TH} = \text{const (опорное}$$

напряжение - амперсиря)

$$\tau = 0,0033 \text{ с}$$

$$K_{TH} \frac{\Delta E_{\text{д}}}{\Delta U_{\text{вк}}} = \frac{600}{4}$$

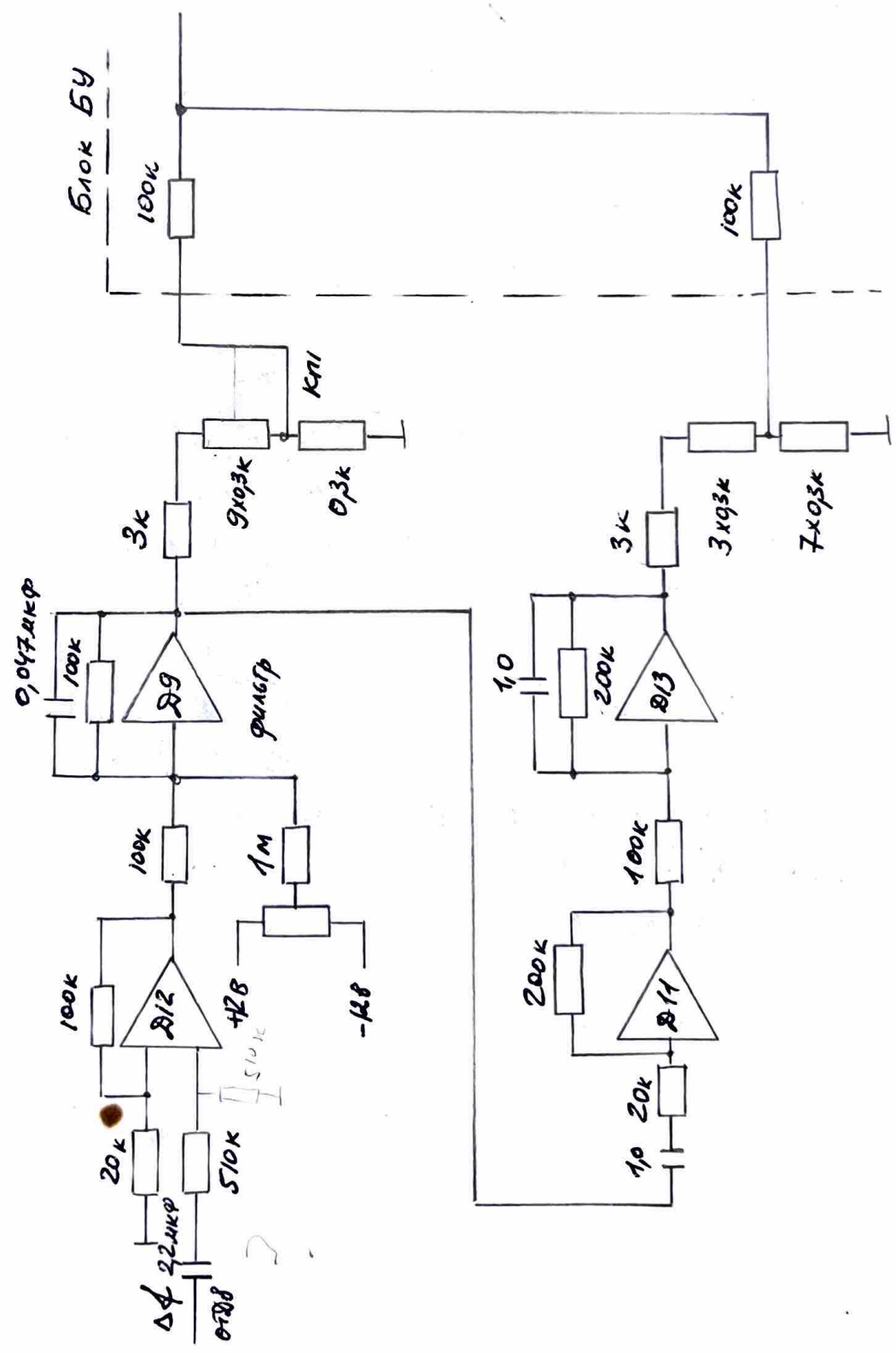
В относительных единицах

$$K_{TH} = \frac{\Delta E_{\text{д}}}{U_{\text{вк}} \cdot \Delta U_{\text{вк}}} = \frac{600}{4 \cdot 166 \cdot 10^3} = 9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{В}}{\text{В}}$$

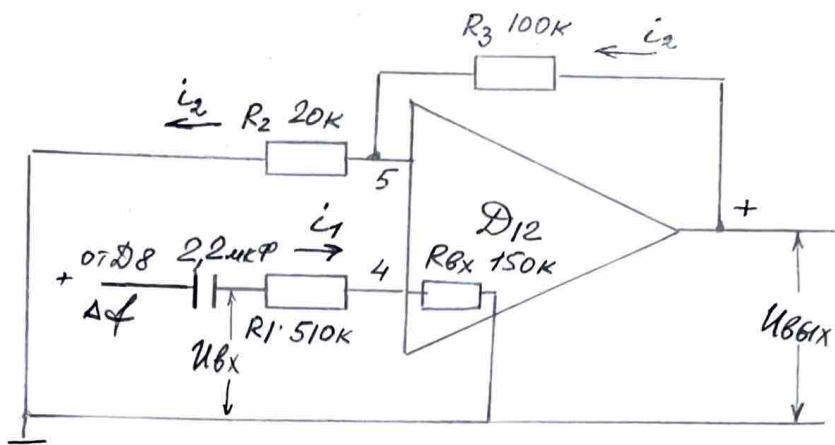
$$G_{TH}(p) = 9 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-p \cdot 0,0033}$$

7.5. Структурная схема блока задания частоты (Б43)

7.5.1. Реальная схема



7.5.2 Схема усилителя D12



$U_{вх}$ - сигнал ~ составляющий

$$U_{вых} = i_2 (R_2 + R_3) \quad i_1 \ll i_2$$

$$U_{вх} = i_2 R_2$$

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

$$K_{D12} = \frac{R_2 + R_3}{R_2} = \frac{120}{20} = 6$$

7.5.3. $G_{D9}(p) = \frac{1}{1 + pT_{D9}}$; $T_{D9} = 0,047 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 0,0047 \text{ c}$

7.5.4. $G_{D11}(p) = \frac{pT_{D11}}{1 + pT_{D11}}$; $T_{D11} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,2 \text{ c}$

7.5.5. $G_{D13}(p) = \frac{K_{D13}}{1 + pT_{D13}}$; $K_{D13} = \frac{200}{100} = 2$;
 $T_{D13} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,2 \text{ c}$

7.5.6 Звено $\frac{\Delta U_{D8}}{\Delta \phi}$

По данным накладки при $\Delta \phi = 1 \text{ Г}$ $\Delta U_{D8} = 0,5 \text{ В}$
 $K_{Z1} = 0,5 \text{ В/Г}$

τ -постоянная задерживающее, равное одному
 периоду нарастания $\tau = 0,02 \text{ c}$
 $e^{-p\tau}$ замечены звеном $\frac{1}{1 + p\tau}$

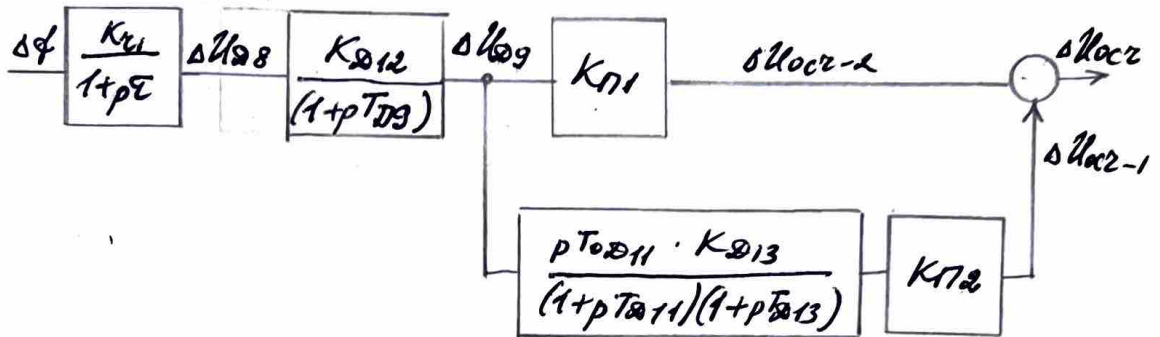
7.5.7 $K_{П1}$ $K_{П2}$

По данным накладки

$$K_{П1} = \frac{0,3}{3 + 10 \times 0,3} = 0,05 \quad (\text{Положение переключателя "K \Delta \phi" - 1})$$

$$K_{п2} = \frac{7 \times 0,3}{3 + 10 \times 0,3} = 0,35 \quad (\text{Положение переключателя "К4" - 7})$$

7.5.8. Преобразование структурной схемы
 $G_{от2}(p)$



$$\frac{\Delta U_{\kappa 2}}{\Delta U_{\kappa 1}} = K_{\pi 1} + \frac{p T_{\kappa 11} \cdot K_{\kappa 13} \cdot K_{\pi 2}}{(1+p T_{\kappa 11})(1+p T_{\kappa 13})} =$$

$$= 0,05 + \frac{p \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot 0,35}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,2)} = 0,05 + \frac{p \cdot 0,14}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,2)}$$

Второй член дробей равен первому при каскаде
 $\omega = \frac{0,05}{0,14} = 0,35$

Положив принцип, упомянутый в п. 7.1.5,
получаем:

$$\frac{\Delta U_{\kappa 2}}{\Delta U_{\kappa 1}} = \frac{0,05(1+p \cdot \frac{1}{0,35})}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,02)} = \frac{0,05(1+p \cdot 2,65)}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,02)}$$

$$G_{от2}(p) = \frac{U_{\kappa 1}}{\Delta \varphi} \cdot \frac{\Delta U_{\kappa 2}}{\Delta U_{\kappa 1}} \cdot \frac{\Delta U_{\kappa 2}}{\Delta U_{\kappa 1}} =$$

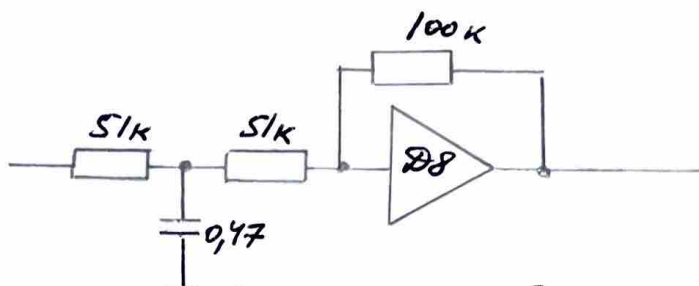
$$= \frac{0,5}{1+p \cdot 0,02} \cdot \frac{6}{1+p \cdot 0,0047} \cdot \frac{0,05(1+p \cdot 2,65)}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,02)} =$$

$$= \frac{0,15(1+p \cdot 2,65)}{(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,0047)}$$

7.6. Структурная схема блока напряжения (БН)

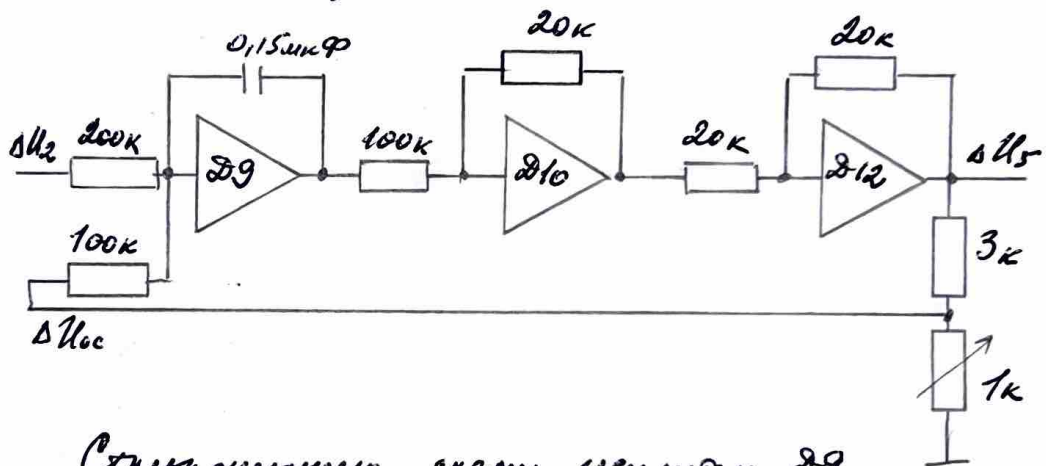
7.6.1. Реальная схема

Усилитель ДД

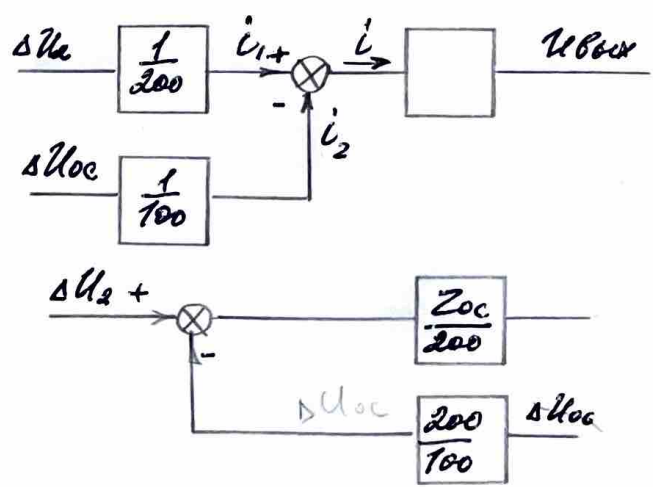


$$G_{\text{ДД}}(p) = \frac{1}{1+pT_1}; \quad T_1 = \frac{51 \cdot 10^3}{2} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6} = 0,012 \text{ c}$$

Звено $\frac{\Delta U_5}{\Delta U_x}$

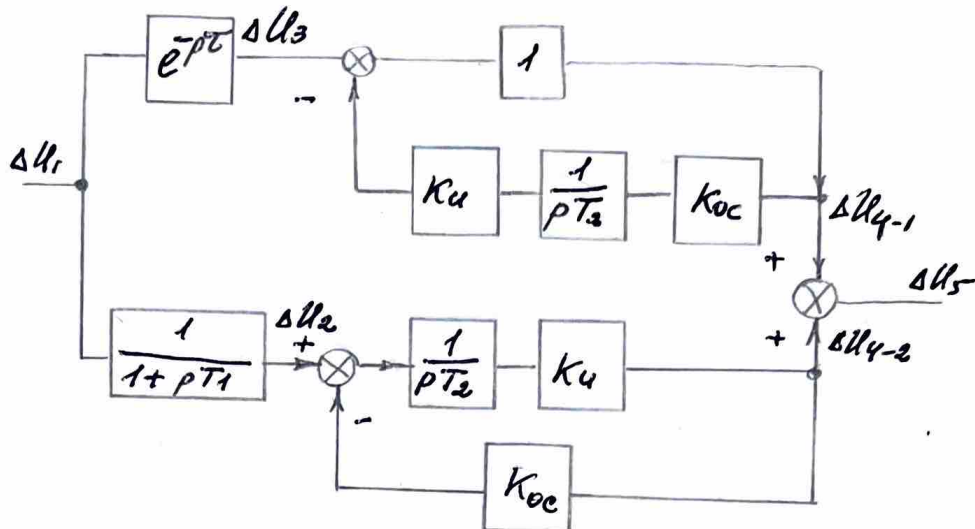


Структурную схему усилителя ДД можно изобразить следующим образом.



$$\frac{\Delta U_{\text{oc}}}{\Delta U_2} = K_{\text{oc}} = K_n \cdot 2; \quad K_n = \frac{1}{4} = 0,25 \quad \left(\begin{array}{l} \text{Перемножаем} \\ \text{коэф. в цепи} \\ \text{или 4)} \end{array} \right)$$

Приведен контур к виду:



$$\frac{\Delta U_{4-1}}{\Delta U_3} = \frac{1}{1 + \frac{K_u \cdot K_{oc}}{pT_2}} = \frac{pT_2}{pT_2 + K_u \cdot K_{oc}} = \frac{pT_2}{K_u K_{oc}} \cdot \frac{1}{1 + p \frac{T_2}{K_u \cdot K_{oc}}}$$

Обозначим $\frac{1}{K_{oc}} = k_o$; $\frac{T_2}{K_u} = T_u$; $\frac{\Delta U_{4-1}}{\Delta U_3} = \frac{pT_u \cdot k_o}{1 + pT_u k_o}$;

$$\frac{\Delta U_{4-2}}{\Delta U_2} = \frac{\frac{K_u}{pT_2}}{1 + \frac{K_u K_{oc}}{pT_2}} = \frac{K_u}{pT_2 + K_u \cdot K_{oc}} = \frac{k_o}{1 + pT_u \cdot k_o}$$

$$\frac{\Delta U_5}{\Delta U_1} = \frac{pT_u k_o e^{-p\tau}}{(1 + pT_u k_o)} + \frac{k_o}{(1 + pT_1)(1 + pT_u k_o)}$$

Подставляем реальные величины в выражение

$$\frac{\Delta U_5}{\Delta U_1} = \frac{p \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot e^{-p \cdot 0,0033}}{(1 + p \cdot 0,3)} + \frac{2}{(1 + p \cdot 0,012)(1 + p \cdot 0,3)}$$

Находим графический (рис. 8)

$$\frac{\Delta U_5}{\Delta U_1} = \frac{2(1 + p \cdot 0,156)e^{-p \cdot 0,0033}}{(1 + p \cdot 0,3)}$$

$$\frac{\Delta U_6}{\Delta U_5} = K_{п1} + \frac{p \cdot 0,3}{(1 + p \cdot 0,03)^2}$$

По данным находим

$$K_{п1} = \frac{1,5}{11,5} = 0,13$$

Находим графический (рис. 8)

$$K_0 = \frac{1}{K_{oc}} = \frac{1}{0,25 \cdot 2} = 2$$

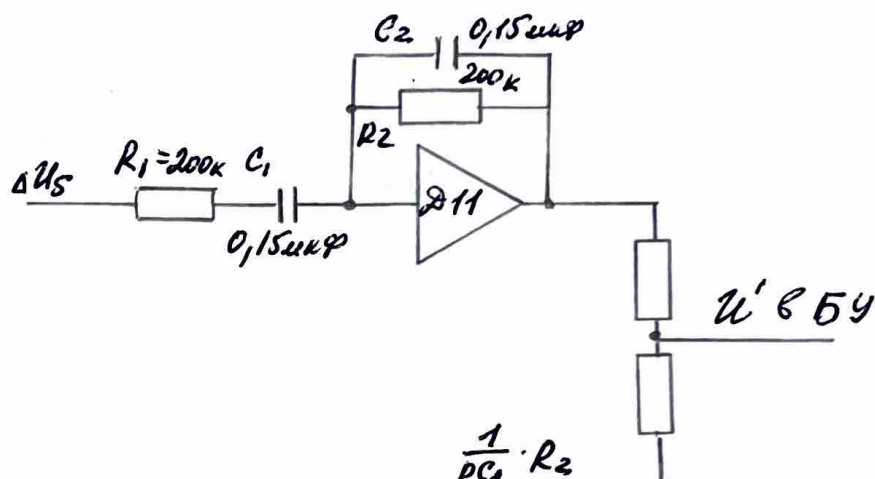
$$K_u = \frac{20}{100} = 0,2$$

$$T_2 = 0,15 \cdot 10^6 \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,03 \text{ c}$$

$$T_M = \frac{0,03}{0,2} = 0,15 \text{ c}$$

Контур $\frac{\Delta U_6}{\Delta U_5}$

Схема усилителя Д11 с обвязкой



$$G_{D11}(p) = \frac{\Delta U_{6-1}}{\Delta U_5} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\frac{\frac{1}{pC_2} \cdot R_2}{\frac{1}{pC_2} + R_2}}{\frac{1}{pC_1} + R_1} = \frac{pC_1 R_2}{(1+pC_2 R_2)(1+pC_1 R_1)}$$

$$\text{Поскольку } C_1 R_2 = C_2 R_2 = C_1 R_1 = 0,15 \cdot 10^6 \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,03 = T_{14}$$

$$K_{\pi} = 1 \text{ (положение переключателя } K_{\pi} \text{ в } 10)$$

$$G_{D11}(p) = \frac{p T_{14} \cdot K_{\pi}}{(1+p T_{14})^2} = \frac{p \cdot 0,03 \cdot 1}{(1+p \cdot 0,03)^2}$$

4.6.2 Преобразование контура $\frac{\Delta U_5}{\Delta U_1}$

$$G_{28}(p) = \frac{1}{1+pT_1}$$

$$G_{29}(p) = \frac{1}{pT_2} \quad K_{210,212} = K_u$$

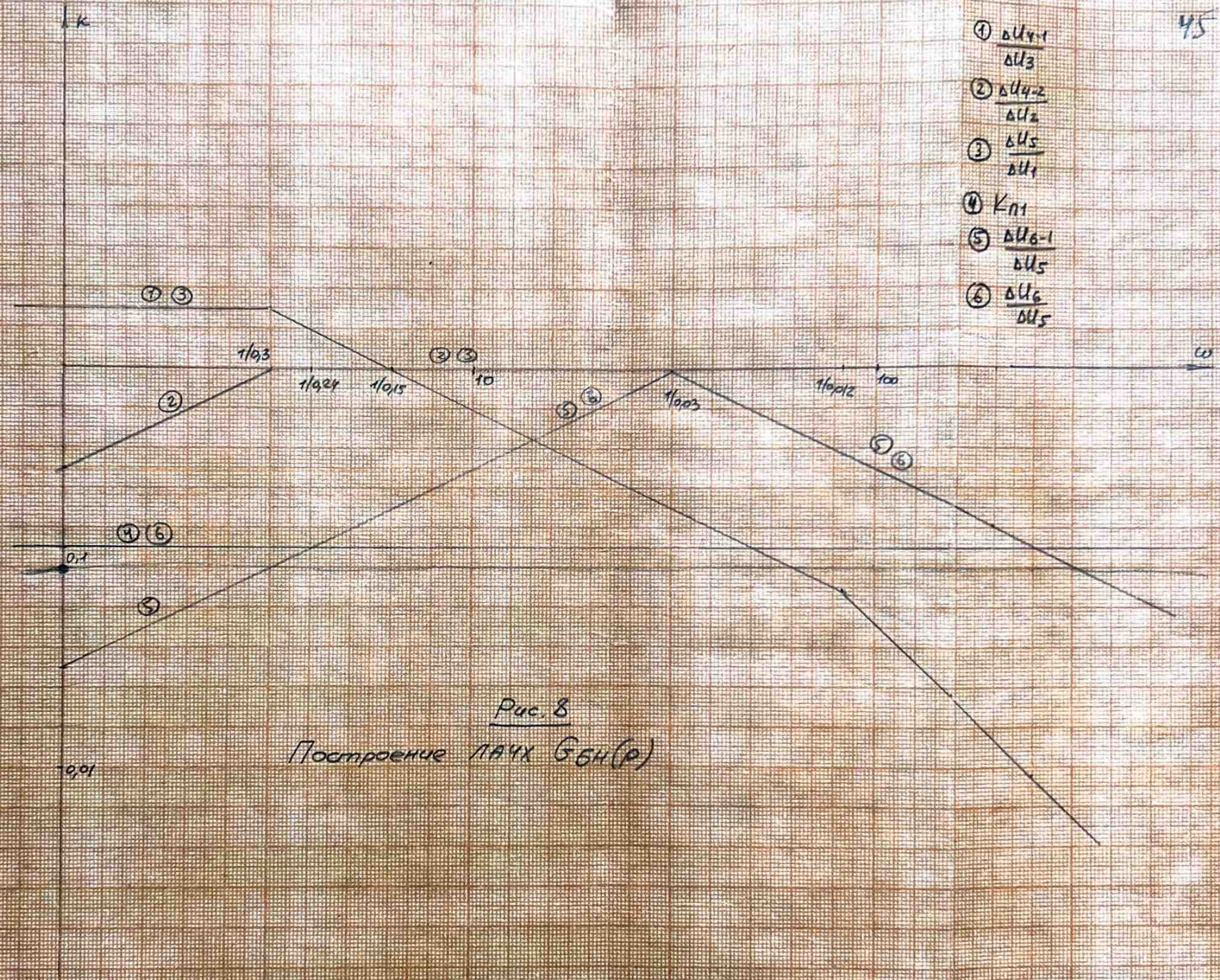


Рис. 8

Построение ЛАЧХ ГСН(Р)

$$\frac{\Delta U_6}{\Delta U_5} \approx \frac{0,13(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 0,03)^2}$$

$$G_{BH}(p) = \frac{\Delta U_5}{\Delta U_1} \cdot \frac{\Delta U_6}{\Delta U_5} = \frac{2(1+p \cdot 0,156)e^{-p \cdot 0,0033}}{(1+p \cdot 0,3)} \cdot \frac{0,13(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 0,03)^2}$$

$$K_{BH} = 2 \cdot 0,13 = 0,26$$

7.7. Датчик реактивного тока (ДРТ)

По данным напарки

$$I_a = 0; I_p = I_{pH} = 21400 \cdot 0,425 = 9100 \text{ А}$$

$$\text{Пороговый ток } K_t = \frac{5}{24000}$$

При I_{pH} на выходе ТТ

$$\frac{5 \cdot 9100}{24000} = 1,94 \text{ А}$$

При 1,94 А на выходе ДРТ - 5 В

В относительных единицах

$$I_{pH*} = \frac{I_{pH}}{I_5} = \frac{9100}{21400} = 0,425$$

$$K_{DRT} = \frac{\Delta U_{оср}}{\Delta I_{p*}} = \frac{5}{1,94} \cdot \frac{1,94}{0,425} = 11,7 \frac{\text{В}}{\text{о.е}}$$

7.8. Преобразование общей структурной схемы системы регулирования

На рис. 9а, б, в, г приведены последовательные этапы преобразования структурной схемы, изображенной на рис. 3. Преобразования выполняются с помощью известных методов, изложенных в [12] и [15]

7.8.1. Заключительный внутренний контур регулирования возбуждения По рис. 9, б

Применяя звено

$$G_{\text{в}}(p) = G_{\text{бв}}(p) \cdot G_{\text{тп}}(p) = \frac{58}{1 + p \cdot 0,0047} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-p \cdot 0,0033} =$$

$$= \frac{0,052}{1 + p \cdot 0,0047} \cdot e^{-p \cdot 0,0033}$$

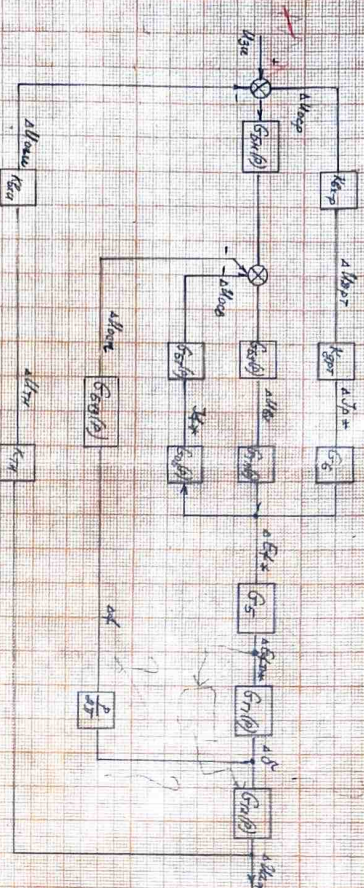
Звено "чистого запаздывания" при анализе статической устойчивости (устойчивости при малых возмущениях, протекающих при низких частотах) не учитывается или может учитываться как инерционное звено вида $\frac{1}{1 + pT}$

При динамической устойчивости (устойчивости при больших возмущениях, вызывающих экстремальные процессы по времени соизмеримые с T) все перерасчетные функции системы регулирования рассматриваются с точностью до промежуточного времени T . На это время система разбивается

Звеном связи от возбуждения (рис. 9, б)

$$H_{\text{св}} = \frac{1}{G_{\text{св}}(p)} = \frac{1}{G_{\text{бт}}(p)} \cdot \frac{1}{G_{\text{ов}}(p)} =$$

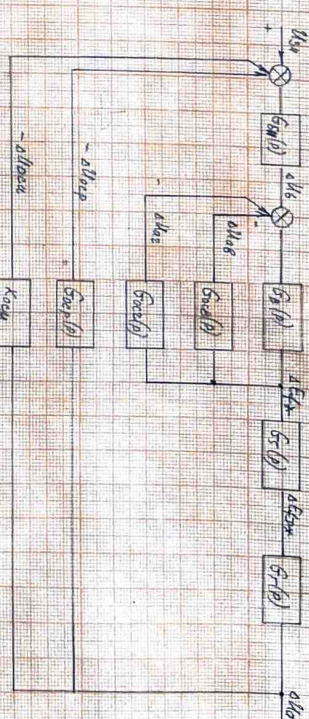
$$= \frac{(1 + p \cdot 0,09)(1 + p \cdot 0,024)(1 + p \cdot 0,012)}{0,26p} \cdot \frac{(1 + p \cdot 5,94)}{490}$$



а)



б)



в)



г)

Рис. 9

Предварительные расчеты опрыскивателя
схема в пункте на рисунке.

$$\frac{G \cdot F \cdot K}{P \cdot I \cdot a} = 0.1$$

10000



д)

при $p=1$ $K = \frac{5,94}{0,26 \cdot 490} = 0,046$

Звено обратной связи по частоте.
(рис. 4.5)

$$K_{осл} = \frac{1}{G_{осл}(p)} = \frac{1}{G_{БЗ}(p)} \cdot \frac{28}{p} \cdot \frac{1}{G_{Г1}(p)} \cdot \frac{1}{G_5} =$$

$$= \frac{(1+p \cdot 0,2)(1+p \cdot 0,02)^2(1+p \cdot 0,047)}{0,15(1+p \cdot 2,65)} \cdot \frac{6,28}{p} \cdot \frac{(1+p \cdot 0,55)^6}{0,00638(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4) \cdot p \cdot 1540} \cdot \frac{1}{1}$$

При $p=1$ $K = \frac{6,28}{0,15 \cdot 2,65 \cdot 0,00638 \cdot 5 \cdot 2,4 \cdot 1540} = 0,13$

Переходная функция замкнутого внутреннего контура регулирования возбуждения

Как и в п. 4.1.5 производим суммирование 2х замкнутых контуров, имеющих общие прямые звенья: контура с обратной связью по возбуждению ($G_{ЗВ-1}$) и контура с обратной по частоте ($G_{ЗВ-2}$) Таким образом:

$$G_{ЗВ}(p) = G_{ЗВ-1} + G_{ЗВ-2}$$

Получаем ЛАЧХ (рис 10)

$$G_{ЗВ-1} = \frac{G_{В}(p)}{1 + G_{В}(p) K_{осл}}$$

При $G_{В}(p) > K_{осл}$ $G_{ЗВ-1} \approx K_{осл}$
 $G_{В}(p) < K_{осл}$ $G_{ЗВ-1} \approx G_{В}(p)$

$$G_{ЗВ-2} = \frac{G_{ВР}}{1 + G_{В}(p) K_{осл}}$$

Поскольку $G_{ЗВ-1} > G_{ЗВ-2}$, то $G_{ЗВ}(p) \approx G_{ЗВ-1} =$

$$= \frac{0,052(1+p \cdot 5,94)(1+p \cdot 0,02)^2 \cdot p \cdot 0,0033}{(1+p \cdot 6,2)(1+p \cdot 0,02)}$$

0,085

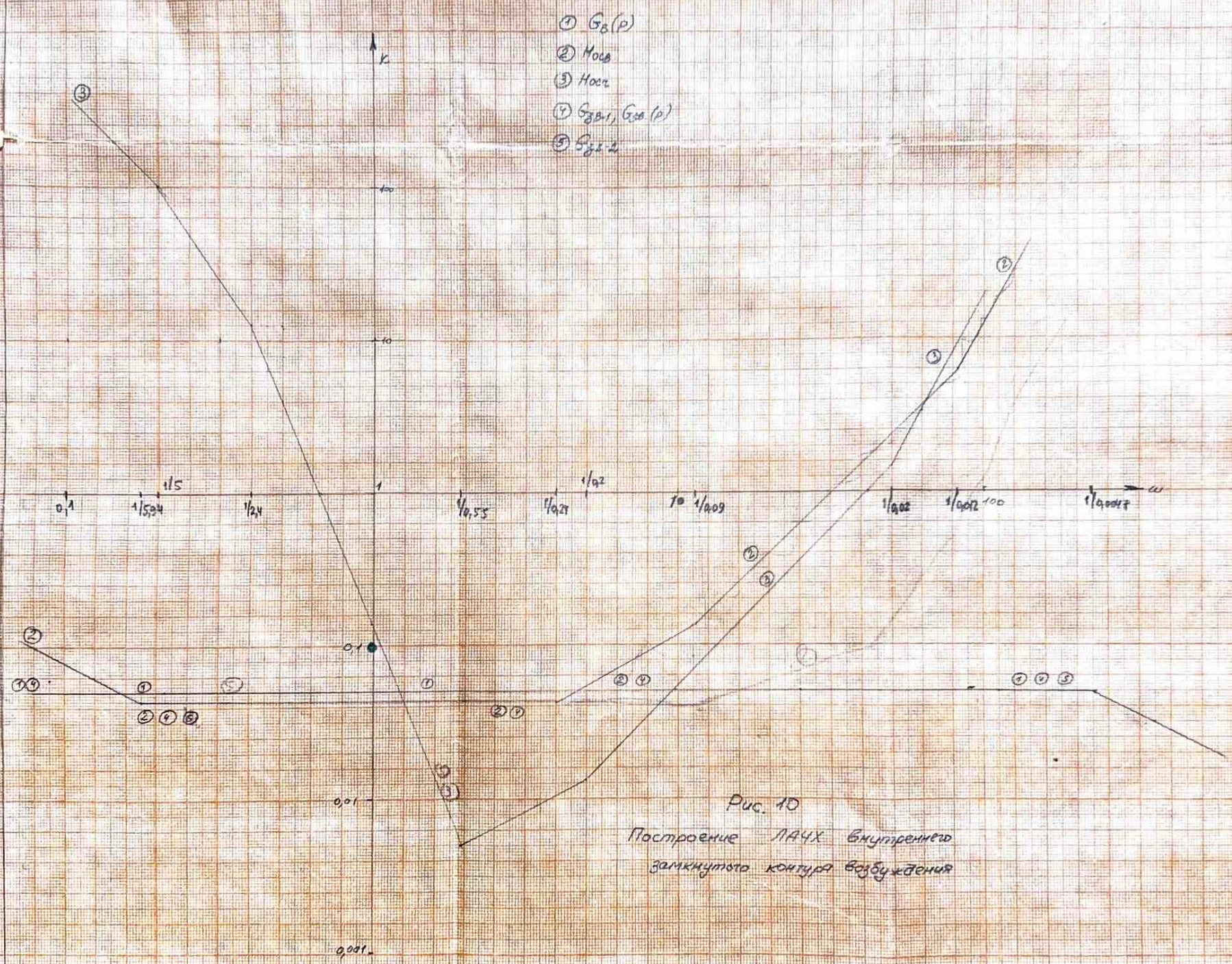


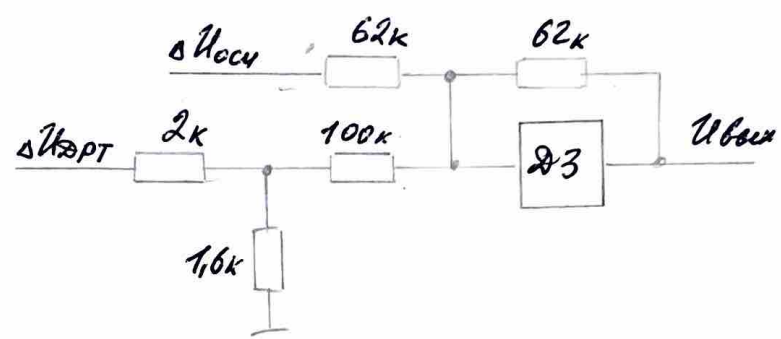
Рис. 10
 Построение ЛАЧХ внутреннего
 замкнутого контура возбуждения

4.8.2. Контур регулирования напряжения генератора.

Звезда обратной связи по реактивной мощности. (См. рис. 9.5)

$$G_{оср}(p) = \frac{\Delta U_{оср}}{\Delta U_{а*}} = K_{вх.р.} \cdot K_{дпр} G_{д}(p) \frac{1}{G_z(p)} \cdot \frac{1}{G_T(p)}$$

Узел входа в усилитель ДЗ в блоке БН от датчика реактивной мощности.



Аналогично показанному в 4.6 получим

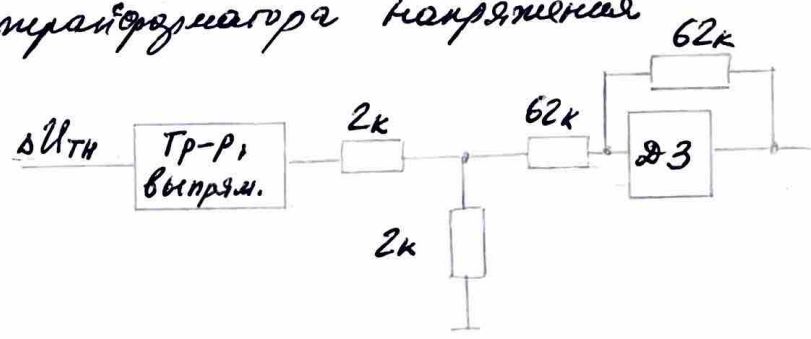
$$K_{вх-р} = \frac{1,6}{3,6} \cdot \frac{62}{100} = 0,27$$

$$G_{оср}(p) = 0,27 \cdot 11,7 \cdot 0,59 \cdot \frac{1}{1540} \cdot \frac{(1+p \cdot 2,4)}{0,11} = 0,011(1+p \cdot 2,4)$$

Звезда обратной связи по напряжению (рис. 9.5)

$$K_{осн} = \frac{\Delta U_{осн}}{\Delta U_{а*}} = K_{вх-н} \cdot K_{тн}$$

Узел входа в усилитель ДЗ в блоке БН от трансформатора напряжения



При $\Delta U_{TH} = 100 \text{ В}$

$$U_{выпр} = 41,6 \text{ В}$$

$$K_{вх-и} = \frac{41,6}{100} \cdot \frac{2}{4}$$

$$K_{TH} = \frac{100}{24000}; \text{ В относительных единицах.}$$

$$K_{TH} = \frac{\Delta U_{TH}}{\Delta U_{а+}} = \frac{100}{1}; K_{оси} = \frac{41,6}{100} \cdot \frac{2}{4} \cdot \frac{100}{\sqrt{3}} = 12$$

Суммарная обратная связь по напряжению и реактивной мощности

Находим графически (рис 11) $K_{оси}$

$$G_{оси, p}(p) = K_{оси} \cdot G_{оср}(p) \approx 12(1 + p \cdot 0,003)$$

При $\omega > 330$ суммарная о.с. становится положительной
Переходная функция контура регулирования напряжения в режиме номинальной нагрузки (из рис. 9,2)

$$G_{кн}(p) = G_{БН}(p) \cdot G_{ЭВ}(p) \cdot G_5 \cdot G_7(p) \cdot G_{оси, p}(p) = 630$$

$$= \frac{0,26(1+p \cdot 0,156)(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 0,3)(1+p \cdot 0,03)^2} \cdot \frac{0,052 \cdot (1+p \cdot 5,94)(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 6,2)(1+p \cdot 0,02)(1+p \cdot 0,0047)} \cdot 1540 \cdot \frac{0,11}{1+p \cdot 2,4} \cdot 12; \frac{\Delta U_{а+}}{\Delta E_{д+}} = \frac{1540 \cdot 0,11}{1+p \cdot 2,4} = \frac{1694}{1+p \cdot 2,4}$$

$$K_{кн} = 0,26 \cdot 0,052 \cdot 1540 \cdot 0,11 \cdot 12 = 27,5$$

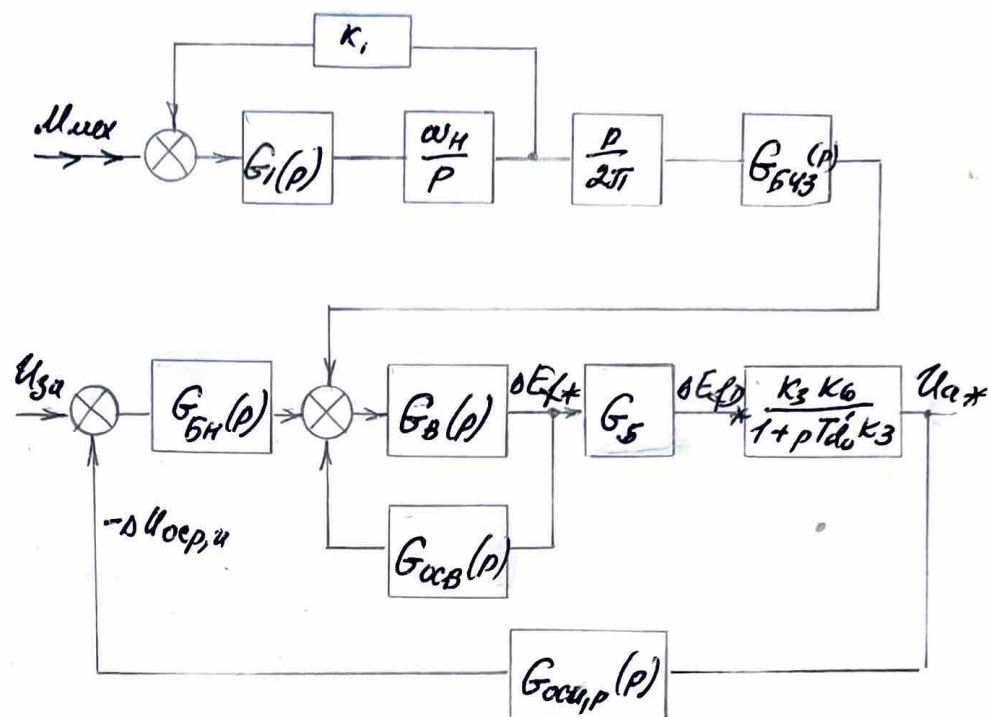
ЛАЧХ разомкнутого контура регулирования напряжения напряжение показано на рис. 11

Переходная функция контура регулирования напряжения в режиме холостого хода.

Исходя из переходных функций генератора (раздел 7.1.4), найдем структурную схему системы регулирования

влияние в режиме холостого хода

53



$$\frac{\Delta U_{а*}}{\delta E_{ф*}} = \frac{1069 \cdot 1,5}{1+p2,4} = \frac{1063}{1+p2,4}$$

$G_{6H}(p)$ в режиме холостого хода сводится
к $G_{6H}(p)$ в режиме нагрузки только коэф-
фициентом K_{PH}

В режиме холостого хода

$$K_{KKO} = \frac{27,5 \cdot 1063}{1694} = 17,2$$

ЛАЧХ конгура будет проходить соответ-
ственно ниже.

в реж. нагрузки

3. Анализ устойчивости системы регулирования

54

3.1. Статическая устойчивость

Статической устойчивостью называют устойчивость системы регулирования при малых возмущениях, т.е. возмущениях, при которых система остается линейной.

Анализ производим на основании структурной схемы системы регулирования, приведенной в разд. 4. Коэффициенты $K_1 \dots K_5$ структурной схемы зависят от нагрузки. В [11] показано, что наибольшие изменения коэффициентов происходят в районе резонансной частоты нагрузки. Из приведенных в [11] кривых видно, что при изменении нагрузки на 10% коэффициенты изменяются не более чем на 10% и могут считаться постоянными и мы можем пользоваться системой линеаризованных уравнений, приведенных в разд. 4.

В соответствии с [12] об устойчивости системы регулирования мы можем судить по виду ЛАЧХ размыкнутой системы.

Если при "частоте среза" (ω_c , при которой $K=1$) избыток фазы ($\Delta\varphi_c = 180^\circ + \varphi$) больше нуля, система может считаться устойчивой. φ — сдвиг по фазе при ω_c , т.е. эл. угол, на который выходной сигнал отстает от входного:

$$\text{Из рис 1.1 } \omega_c = 40 \\ \varphi = -2 \log_{10} 40 \cdot 0,03 = -2 \log_{10} 1,2 = -100 \text{ (см. [12])}$$

$\Delta P_c = 180 - 10070$ Система устроена.
При холостом ходе частота среза уменьшается,
 ΔP_c увеличивается

Влияние параметров системы на устойчи-
вость

Блок БН. При установке „к и“ в положе-
ние „6“

$$G_{BN}(p) = \frac{0,52(1+p \cdot 0,156)(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 0,6)(1+p \cdot 0,03)^2}$$

ЛФЧХ системы нормируется, ω_c увели-
чивается, система может оказывать реу-
лирующую. При изменении „к и“ в сто-
рону уменьшения изменение ω_c
($1+p \cdot 0,24$) приводит к уменьшению ω_c и
более малому перекрестному процессу.

Блок БУ Увеличение „к б“ при уменьшении
основных координатных усилении умень-
шает координаты уменьшения при

$$\frac{1}{0,24} > \omega > \frac{1}{5,94}$$

Он затем восстанавливается при частоте
 $\omega > \frac{1}{0,24}$. При допущенном сдвиге
к б ω_c может снижаться.

Для оценки качества перекрестного процесса
был воспроизведен метрикой, изложенной
в [13]. Оценка поведения системы при возмущении
при воздействии на систему
единичного толчка заданы $X_T(p) = \frac{1}{p}$
Толчки заданы соответствующим равновесным
режимом работы системы при различных
возмущениях, приводящих к колебаниям
напряжения или реактивной мощности

58

(со стороны обратной связи по напряжению и реактивному току)

Из рис. 11:

Передаточная функция разомкнутой системы в работе ие

$$G_p = \frac{1,4}{(1+0,03p)^2}$$

Передаточная функция замкнутой системы

$$G_3 = \frac{\frac{1,4}{(1+p \cdot 0,03)^2}}{1 + \frac{1,4}{(1+p \cdot 0,03)^2}} = \frac{1,4}{1+p \cdot 0,06 + p^2 \cdot 0,03^2 + 1,4} \approx \frac{1,4}{2,4+p \cdot 0,06} = \frac{1,4}{0,06(p + \frac{2,4}{0,06})} = \frac{23,3}{p+40}$$

? можно ли упростить?

Изображение Лапласа для переходного процесса замкнутой системы при воздействии на неё $X_T(p) = \frac{1}{p}$:

$$F_T(p) = \frac{1 \cdot 23,3}{p(p+40)} = \frac{C_1}{p} + \frac{C_2}{p+40}$$

$$C_2 = \frac{23,3}{-40} = -0,58$$

$$C_1 = \frac{23,3}{40} = 0,58$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, получаем оригинал выражения $F(p)$

$$f_T = 0,58 - 0,58 e^{-40t} = 0,58(1 - e^{-40t})$$

Единичная переходная функция системы на единичный толчок задания показана на рис. 12

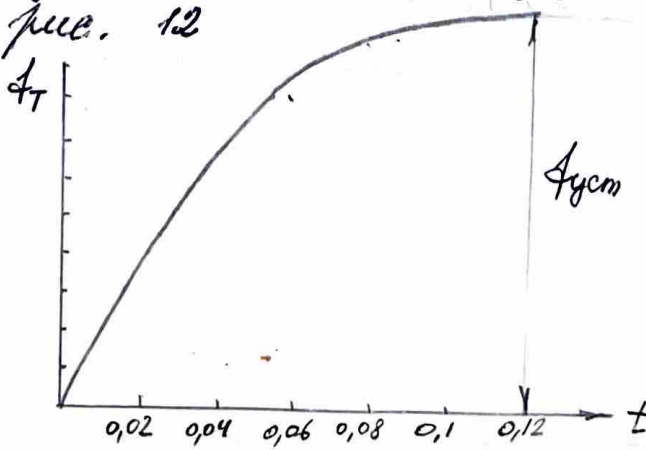


Рис. 12.

При $F_T = 0,1 U_{нr}$ скорость нарастания напряжения $\frac{dU_T}{dt} = \frac{0,1 U_{нr}}{0,10} = 1 \frac{\text{ед. напр}}{\text{с}}$

Скорость нарастания напряжения возбуждения

$$\frac{dU_f}{dt} = K_{\Delta u} \frac{dU_T}{dt} = 51 \frac{\text{ед. возб}}{\text{с}}$$

$K_{\Delta u}$ - коэффициент усиления регулятора по каналу напряжения

Статизм системы регулирования

$$\sigma = \frac{1}{K_{кн}} = \frac{1}{27,5} = 0,036$$

$K_{кн}$ - коэф. усиления контура напряжения.
(см 7.8.2)

8.2. Динамическая устойчивость.

Динамической устойчивостью называют устойчивость системы при больших возмущениях, т.е. при возмущениях, когда система становится нелинейной. Как уже говорилось в 8.1 при изменениях нагрузки до 10% систему еще можно считать линейной.

При работе с $U_T = 0,95 U_{нr}$ изменение (увеличение) нагрузки на 10% приведет к двукратной форсировке возбуждения. При дальнейшем увеличении нагрузки система разбалансируется. Но не проработает при снижении нагрузки. Срабатывает ограничение минимального возбуждения, система также разбалансируется и об ее устойчивости говорить не приходится.

Упрощенное выражение передаваемой мощности для инвертора, работающего

на систему неограниченной мощности:

X3

$$P = (U_t U_a / \sqrt{2}) \sin \delta$$

U_t - напряжение на выводах машины

U_a - напряжение на шинах системы неограниченной мощности.

При к.з. напряжение U_t снижается, P снижается пропорционально. Для поддержания U_t и P на заданном уровне необходимо как можно меньшее время действия возбудителем патамного возбуждения. При отключении к.з. сопротивление x увеличивается и требуется повторное быстрое действие системы возбуждения.

Система регулирования построена таким образом, что в прямых звеньях - преимущественно форсирующие звенья. В обратных звеньях - демпфирующие звенья для обеспечения статической устойчивости при замыкании системы регулирования.

Таким образом, система регулирования возбуждения обеспечивает перерыв активной мощности даже при возмущениях.

Как было показано (8.1) скорость нарастания напряжения возбуждения при изменении напряжения на 10% - 51 $\frac{\text{св. вольт}}{\text{с}}$

При изменении U_t на 50%

$$\frac{dU_t}{dt} = 250 \frac{\text{св. вольт}}{\text{с}}$$

много велика,
т.е. не учитываю
малое пост. время,
которое здесь присутствует

Весьма информативны предположения
о ген. уст.

59

8.3. Устойчивость генератора при работе в энергосети

При колебаниях мощности, передаваемой энергосетью, возникают колебания между отгруженным параллельно работающим генераторами этой энергосети.

На рис. 13 показана структурная схема при возмущениях, возникающих в результате изменений угла δ генератора.

В данной замкнутой системе петлевым возмущением является изменение в обратной связи при нулевом задании.

По рис. 13:

Передаточная функция прямой звеньев

$$G_{впр}(p) = G_{зв}(p) \cdot G_5$$

$$G_{впр}(p) = \frac{0,052(1+p \cdot 5,94)(1+p \cdot 0,24)}{(1+p \cdot 6,2)(1+p \cdot 0,22)} \cdot 1540 \cdot \frac{0,00638 p(1+p \cdot 5)}{(1+p \cdot 0,55)^6} \cdot (1+p \cdot 2,4)$$

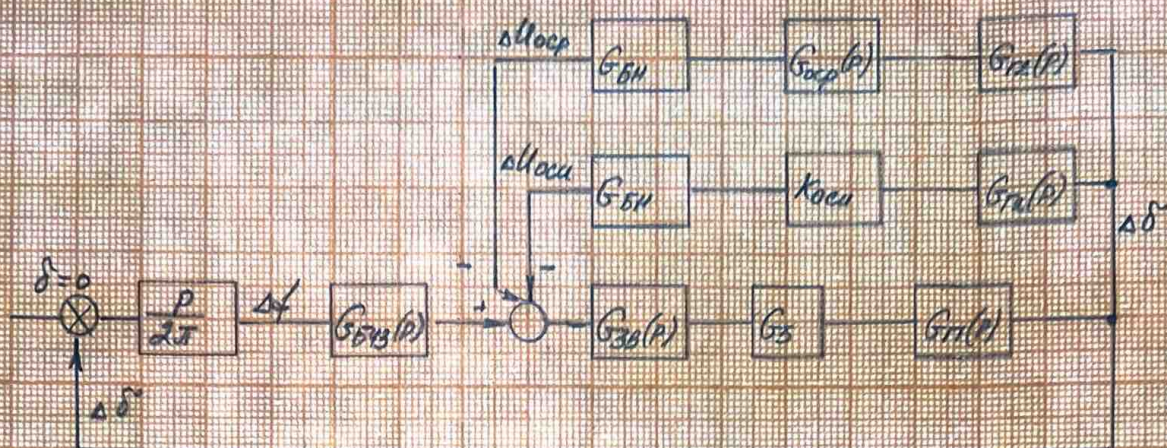
$$\text{при } p=1 \quad K = \frac{0,052 \cdot 5,94 \cdot 1540 \cdot 0,00638 \cdot 5 \cdot 2,4}{6,2} = 5,83$$

Звено ос по реактивной мощности

$$\frac{1}{G_{оср}(p)} = \frac{1}{G_{бн}(p) G_{оср}(p) \cdot G_{т2}(p)} =$$

$$= \frac{(1+p \cdot 0,3)(1+p \cdot 0,03)^2}{0,26(1+p \cdot 0,156)(1+p \cdot 0,24)} \cdot \frac{1}{0,011(1+p \cdot 2,4)} \cdot \frac{p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)^2}{15,8 \cdot (1+p \cdot 0,55)^6}$$

$$\text{при } p=1 \quad K = \frac{5 \cdot 2,4^2}{0,26 \cdot 0,011 \cdot 2,4 \cdot 15,8} = 262$$



а)



б)

Рис 13

Структурная схема системы регулирования
при колебаниях δ

Звезда о.с по напряжению

$$\frac{1}{G_{осн}(p)} = \frac{1}{G_{вн}(p) K_{осн} G_{гз}(p)} =$$

$$= \frac{(1+p \cdot 0,3)(1+p \cdot 0,03)^2}{0,26(1+p \cdot 0,156)(1+p \cdot 0,24)} \cdot 12 \frac{p(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)^2}{15,8(1+p \cdot 0,55)^6}$$

при $p=1 \quad K = \frac{12 \cdot 5 \cdot 2,4^2}{0,26 \cdot 15,8} = 83$

В соответствии с ЛАЧХ, показанным на рис. 14 по принципу, изложенному в п.7.1.5, получаем

$$G'_{гз}(p) = G_{гпр}(p)$$

$$G_{гз}(p) = G_{бчз}(p) \cdot G'_{гз}(p) \cdot \frac{p}{2\pi} =$$

$$= \frac{0,15(1+p \cdot 2,65)}{(1+p \cdot 0,2)(1+p \cdot 0,02)^2(1+p \cdot 0,047)} \cdot \frac{p \cdot 0,51(1+p \cdot 5,94)(1+p \cdot 5)(1+p \cdot 2,4)}{(1+p \cdot 6,2)(1+p \cdot 0,55)^6} \cdot$$

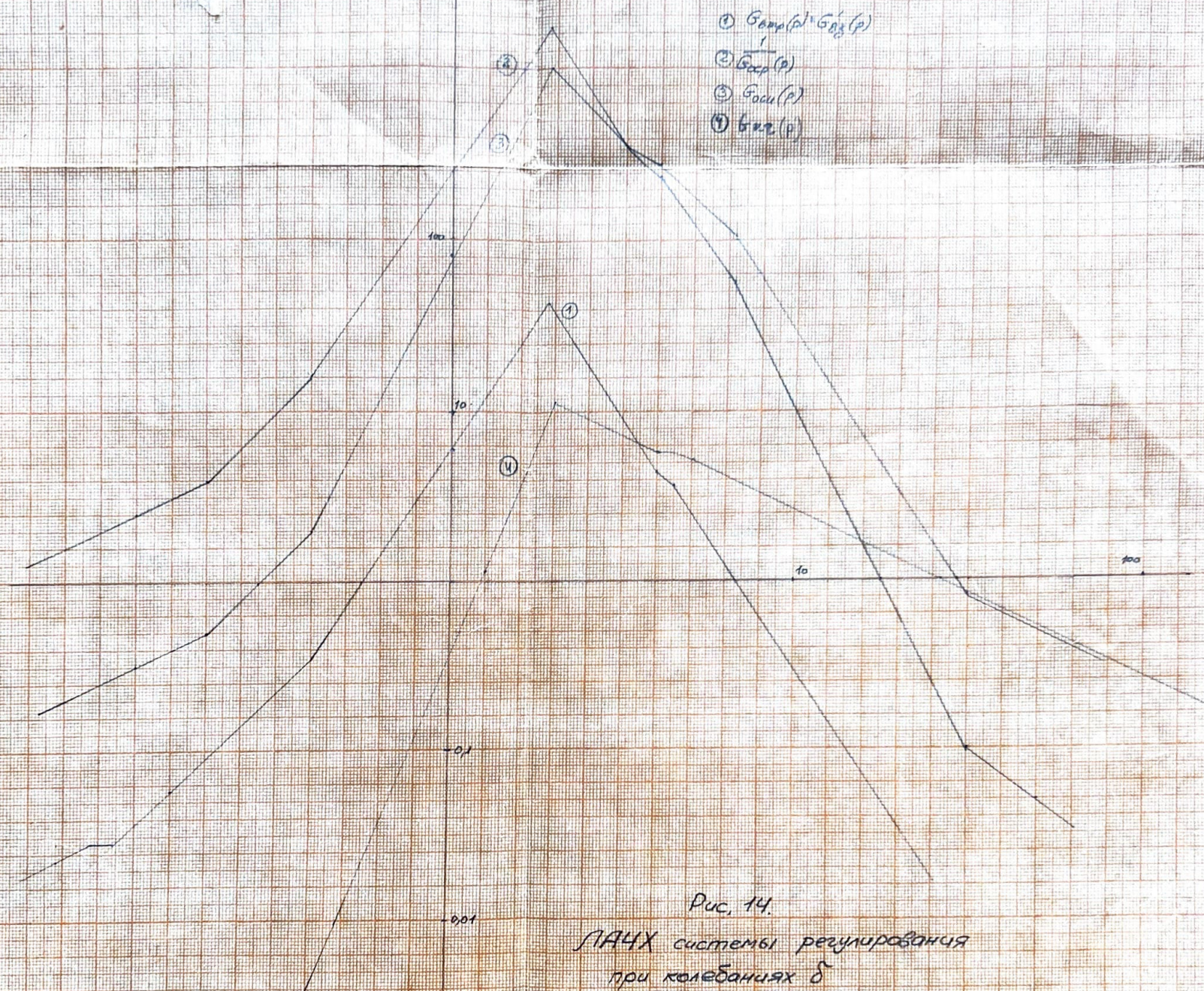
$$\frac{(1+p \cdot 0,24) \cdot p}{(1+p \cdot 0,22) \cdot 6,28}$$

при $p=1 \quad K = \frac{0,15 \cdot 2,6 \cdot 0,51 \cdot 5,94 \cdot 5 \cdot 2,4}{6,2 \cdot 6,28} = 0,38$

Как и в 8.1 по виду ЛАЧХ размыкнутой системы регулирования определяем, что система устойчива, т.к. при частоте среза ($\omega_c = 27$) имеет наклон 20 дБ/дек [12]. При увеличении частоты коэффициент усиления стремится к нулю, что соответствует нулевому заданию в регулятор.

Как видно из ЛАЧХ ($G'_{гз}(p)$), при отсутствии обратной связи по производной частоты (блок БЧЗ) система была бы неустойчивой (в районе ω_c - наклон 60 дБ/дек).

Таким образом, введение ее по производной частоты стабилизирует систему при



колебаниях в энергосети.

При больших изменениях δ система становится неустойчивой, но блок БЧЗ способствует гашению колебаний и восстановлению нормального установившейся режима.

колебания в энергетике.

При больших изменениях δ система становится неустойчивой, но блок БЧЗ способствует затуханию колебаний и восстановлению нормального установившегося режима.

64

Расчет экономического эффекта
от внедрения предложения.

Экономический эффект достигается за счет сокращения объемов нагрузки по причине отключения РВЛ. При неработающей э. энергии повышается себестоимость квт. час за счет повышения доли условно-постоянных расходов.

За 1985г условно-постоянные расходы в себестоимости 1 квт. час составили 0,375 коп.

Согласно "Методики (основные положения) определения экономического эффекта внедрения в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений" экономический эффект

$$Э_r = \Delta C_x \pm E_n \Delta K_n, \text{ где}$$

ΔK - капитальные вложения (дополнительные), возникающие введением предложения. В данном случае они равны нулю

E_n - нормативный коэффициент (для отрасли = 0,15)

ΔC_x - экономия ^{годового} себестоимости.

При равенстве выпуска продукции до внедрения и после внедрения предложение ΔC_x равна суммарным снижениям условно-постоянных расходов. ($\Sigma C_{уд.пост.}$)

$$\Sigma C_{уд.пост.} = Э_r = C_{уд.пост.уд.} Q, \text{ где}$$

Q - ~~количество~~ Q - снижение ~~выпуска~~ э. энергии во время отключения РВЛ. По данным оперативных журналов за ^{изученный} период до внедрения предложение Q составил 2000 МВт

$$Э_r = 0,375 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 10^6 = 7500 \text{ руб.}$$

Дополнительный экономический эффект создается
(экономия и потребности)
за счет того, что уменьшается увеличение
стоимости за топливо 1 кВт-час при сбое на Сургутской
ГРЭС-2 и увеличение ее потребления с Редутинской
ГРЭС. Стоимость 1 т усл. топлива на Редутинской
ГРЭС составляет , на Сургутской ГРЭС-2
руб. При потреблении топлива на 1 кВт час
на Сургутской ГРЭС-2
на Редутинской
1 МВт-час сброса мощности приводит к роко-
нелизным расходам