

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт  
Факультет Энергетический  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_ / В.В. Пиминов  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.  
Челябинск  
ТЭЦ-3

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя паровыми блоками при коротких замыканиях в энергосистеме

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)**  
**ЮУрГУ – 13.04.02. 2017. 00036. ВКР**

Консультант, должность

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Руководитель, профессор

\_\_\_\_\_ / М.Е. Гольдштейн /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Консультант, должность

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Автор

студент группы П – 282  
\_\_\_\_\_ / А.Д. Поснова /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Консультант, должность

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

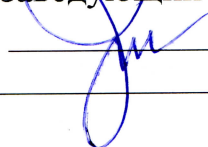
Нормоконтролер, профессор

\_\_\_\_\_ / М.Е. Гольдштейн /  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(национальный исследовательский университет)

Институт Политехнический  
Факультет Энергетический  
Кафедра Электрические станции, сети и системы электроснабжения  
Направление Электроэнергетика и электротехника

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 /И.М. Кирпичникова/  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную научную работу (диссертацию) студента

Поснова Анастасия Дмитриевна

(Ф. И.О. полностью)

Группа П-282

#### 1. Тема выпускной квалификационной работы

Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя паровыми блоками при коротких замыканиях в энергосистеме

утверждена приказом по университету от 28.04.2017 г. №835(приложение №27)

#### 2. Срок сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_

#### 3. Исходные данные к работе

Тепловая электрическая станция состоит из двух паровых блоков с генераторами ТЗВ-220-2. Генераторы подключены к блочным трансформаторам мощностью 250 МВА через генераторные выключатели, за которыми подключены трансформаторы собственных нужд с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА. Необходимо выбрать рабочую и резервную системы возбуждения для данных генераторов, их трансформаторы возбуждения, а также провести анализ работы при коротких замыканиях в энергосистеме, сделать выводы.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

1 Анализ режимов работы систем возбуждения с учетом удаленности мест

1.1 Система тиристорная независимого возбуждения

1.2 Система тиристорная самовозбуждения

1.3 Система тиристорная самовозбуждения резервная

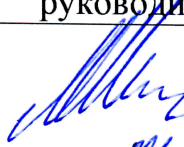
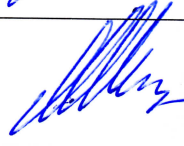
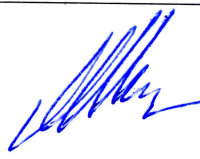
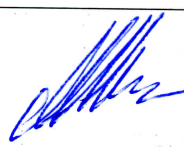
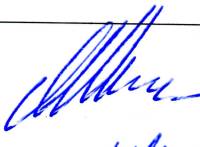
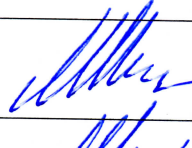
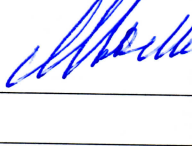
2 Исследование режима работы рабочей системы самовозбуждения при форсировке током, превышающим двукратный







## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка выполнения руководителем
Сбор данных для выполнения ВКР, поиск литературы, технических описаний	10.09.2016 – 30.11.2016	
Анализ режимов работы системы тиристорной независимого возбуждения (СТН)	01.12.2016 – 15.02.2017	
Выбор системы тиристорной самовозбуждения (СТС) для заданного генератора. Анализ режимов работы	16.02.2017 – 15.03.2017	
Выбор системы тиристорной самовозбуждения резервной (СТСР) для заданного генератора. Анализ режимов работы	16.03.2017 – 31.03.2017	
Исследование режима работы СТС при форсировке током до трехкратного	01.04.2017 – 30.04.2017	
Оформление пояснительной записки	01.05.2017 – 21.05.2017	
Подготовка презентации	22.05.2017 – 31.05.2017	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /И.М. Кирпич

Руководитель работы \_\_\_\_\_ /М.Е. Гольд

Студент  \_\_\_\_\_ /А.Д. По

## АННОТАЦИЯ

Поснова А.Д. Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя паровыми блоками при коротких замыканиях в энергосистеме. – Челябинск: ЮУрГУ, П-282; 2017, 81 с., 23 ил., 9 таблиц, библиогр. список – 21 наим., 1 прил.

В выпускной квалификационной работе для электрической станции с двумя паровыми блоками произведен анализ режимов работы систем независимого возбуждения и самовозбуждения генераторов в зависимости от удаленности места короткого замыкания в энергосистеме. Произведены расчеты для системы тиристорной независимого возбуждения (СТН), построены зависимости напряжения на выводах генератора от места короткого замыкания в энергосистеме. Выбрана типовая система тиристорная самовозбуждения (СТС) и тиристорная система самовозбуждения резервная (СТСР), которые выпускаются в России на предприятии ПАО "Силовые машины". Для СТС и СТСР также произведены расчеты, проанализированы результаты и построены зависимости. Проведено сравнение СТН и СТС, а также СТС и СТСР. При близких коротких замыканиях существенно снижается напряжение на выводах генераторов и тиристорные системы самовозбуждения при нормируемых алгоритме и параметрах режима форсировки не могут не только восстановить рабочее напряжение генераторов, а в некоторых случаях даже провести форсировку. Поэтому проведено исследование по увеличению тока возбуждения при форсировке до трехкратного с проверкой обмотки ротора и тиристоров по нагреву, чтобы попытаться избежать существенного снижения напряжения на выводах генератора.

13.04.02.2017.00036.ВКР

Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата			
Разраб.		Поснова А.Д.			Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя паровыми блоками при коротких замыканиях в энергосистеме		
Провер.		Гольдштейн М.Е.					
Реценз.		Пиминов В.В.					
И. Контр.		Гольдштейн М.Е.					
Итв. Верд.		Кирпичникова И.М.					
					Лит.	Лист	Листов
					П	4	81
					ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ		

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....	7
2 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ УДАЛЕННОСТИ МЕСТА КЗ .....	10
2.1 Система тиристорная независимого возбуждения.....	10
2.2 Система тиристорная самовозбуждения .....	23
2.3 Система тиристорная самовозбуждения резервная .....	45
3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РАБОЧЕЙ СИСТЕМЫ САМВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ФОРСИРОВКЕ ТРЕХКРАТНЫМ ТОКОМ.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	79
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРЕЗЕНТАЦИЯ.....	81

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				5
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		



## ВВЕДЕНИЕ

Системы возбуждения относятся к числу наиболее ответственных элементов генераторов. Несмотря на то, что относительная мощность возбудителей невелика и составляет всего 0,4—0,6% мощности генераторов, их характеристики существенно влияют как на устойчивость работы генераторов, так и на устойчивость двигательной нагрузки собственных нужд электростанции. Последнее очень существенно для обеспечения устойчивости технологического режима мощных блочных станций.

При близких коротких замыканиях существенно снижается напряжение на выводах генераторов и тиристорные системы самовозбуждения при нормируемых алгоритме и параметрах режима форсировки не могут не только восстановить рабочее напряжение генераторов, а в некоторых случаях даже провести форсировку, поднимая напряжение и ток возбуждения. Возникает лавина напряжения, генератор теряет возбуждение и отключается защитами. В системах возбуждения с микропроцессорным управлением несложно изменить алгоритм процесса форсировки. Поэтому представляет интерес определить, нельзя ли, сделав алгоритм адаптивным к удаленности короткого замыкания, сохранить генератор в системе.

В соответствии с заданием в выпускной квалификационной работе проводится анализ режимов работы систем возбуждения для генераторов с учетом удаленности места короткого замыкания.

		<i>Поснова А.Д.</i>			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	Лист
		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				6
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тепловая электростанция состоит из двух паровых блоков с турбогенераторами ТЗВ–220–2. Генератор подключен к блочному трансформатору мощностью 250 МВА через генераторный выключатель. За генераторным выключателем подключен трансформатор собственных нужд с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА. Необходимо выбрать рабочую и резервную системы возбуждения для данных генераторов, их трансформаторы возбуждения, определить места подключения и их структурные схемы, а также на основании исследования зависимости напряжений на выводах генераторов от удаленности КЗ провести сравнение эффективности систем.

Данные по основному оборудованию приведены ниже в таблицах.

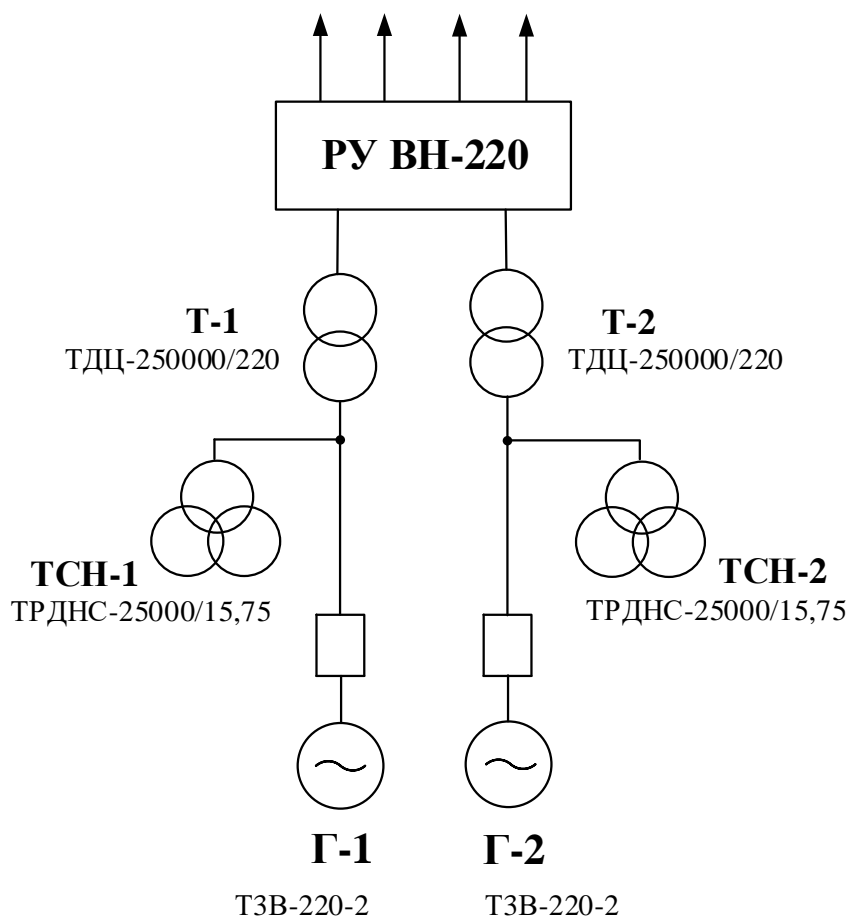


Рисунок 1.1 – Структурная схема ТЭС

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				7
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Таблица 1 – Каталожные данные турбогенератора ТЗВ–220–2 [15]

Тип генератора	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$S$ , МВА	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	КПД, %	$\cos\varphi$	$X_d'$ , отн.ед.	$X_d''$ , отн.ед.
ТЗВ–220–2	220	137	258,8	15,75	98,8	0,85	0,246	0,1906

ТЗВ – генератор с полным водяным охлаждением. Цифра «3» в типе означает число контуров охлаждения (ротор, сердечник, обмотка статора) по [11] и [15].

Преимущества турбогенераторов серии ТЗВ:

- взрывобезопасность и пожаробезопасность;
- повышенная надежность;
- высокая маневренность и перегрузочная способность вследствие низких уровней нагрева и вибрации;
- отсутствие масляных уплотнений вала, вентиляторов и встроенных в статор газоохладителей [3].

Таблица 2 – Каталожные данные блочного трансформатора ТДЦ–250000/220 [14]

Тип	$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	$U_{\text{ВН}}$ , кВ	$U_{\text{НН}}$ , кВ	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$u_k$ , %	$R_T$ , Ом	$X_T$ , Ом	$\Delta Q$ , кВАр
ТДЦ	250	242	15,75	650	240	11	0,6	25,7	1 125

Расшифровка наименования:

Т – трехфазный;

ДЦ – с принудительной циркуляцией масла и воздуха.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				8
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		



Таблица 3 – Каталожные данные трансформатора собственных нужд  
ТРДНС-25000/15 [8]

Тип	Номинальная мощность, МВА	Номинальные напряжения обмоток, кВ		$u_k$ , %
		ВН	НН	
ТРДНС	25	15,75	6,3	12,7

Расшифровка наименования:

Т – трехфазный;

Р – с расщепленной обмоткой;

Д – охлаждение масляное с дутьем;

Н – с РПН;

С – предназначенный для собственных нужд электростанций [19].

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				9
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

## 2 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ УДАЛЕННОСТИ МЕСТА КЗ

Анализ производится путем сравнения двух видов систем возбуждения: системы тиристорной независимого возбуждения (СТН) и системы тиристорной самовозбуждения (СТС). Для генератора производится расчет системы возбуждения и анализ ее работы при КЗ в энергосистеме.

### 2.1 Система тиристорная независимого возбуждения

Исходные данные:

номинальный ток обмотки ротора генератора  $I_f = 2\ 949\ \text{А}$ ;

номинальное напряжение обмотки ротора генератора  $U_f = 245\ \text{В}$ ;

предельная кратность по напряжению  $K_{\text{П}} = 2,5$ ;

сопротивление сети, с которой связан преобразователь  $X_{\gamma} = 0,08\ \text{о.е.}$ ;

допустимый угол, при котором обеспечивается устойчивая работа возбудителя,  $\delta_{\text{доп}} = 15^\circ$ .

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				10
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Покажем схему системы тиристорной независимого возбуждения на рисунке 2.1.1.

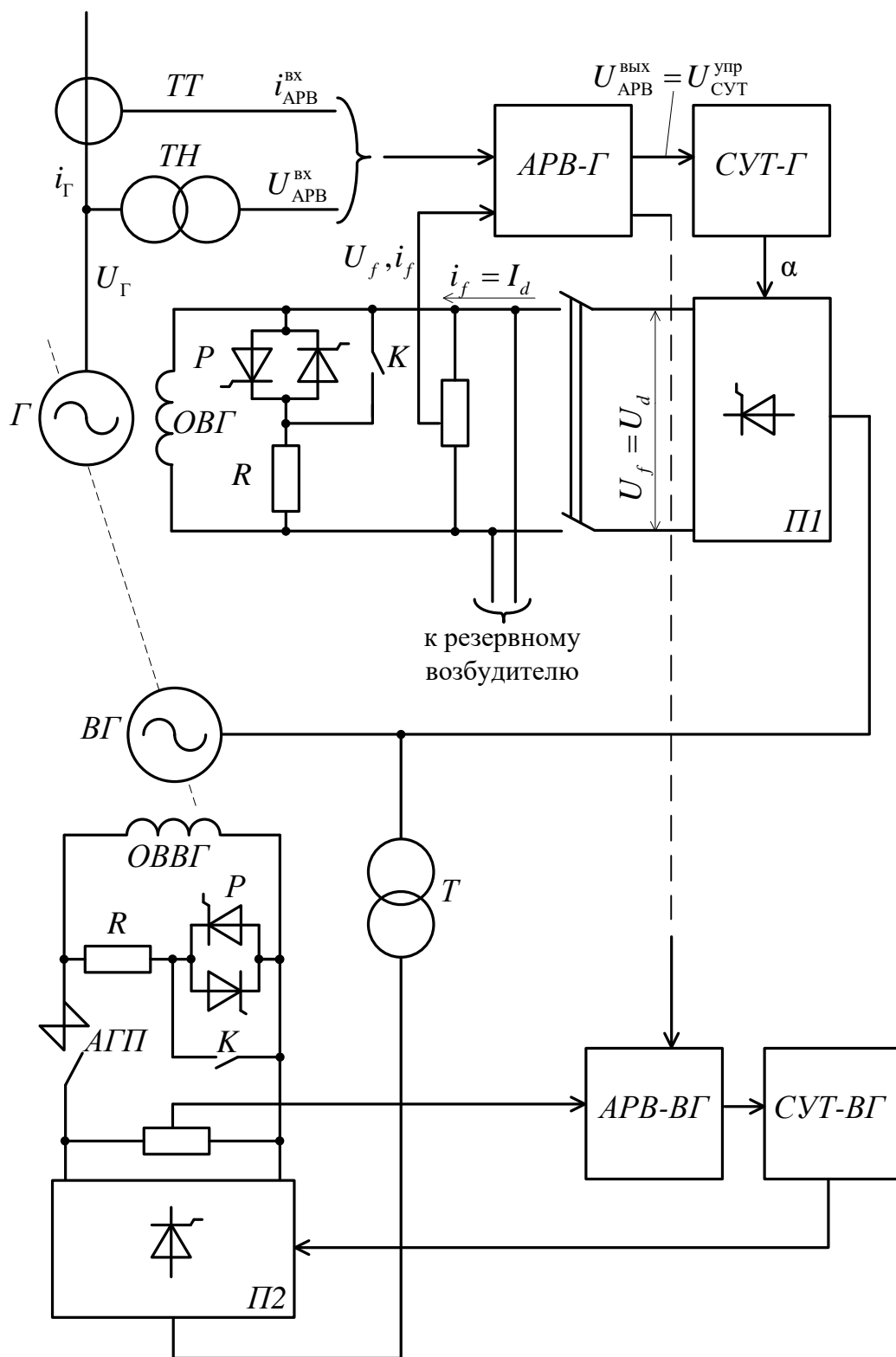


Рисунок 2.1.1 – Схема системы тиристорной независимого возбуждения



Углы в различных режимах работы системы возбуждения [4]:

номинальный режим:

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 X_{\gamma} (K_{\Pi} - 1)}{K_{\Pi}} \right]; \quad (2.1)$$

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,08 \cdot (2,5 - 1)}{2,5} \right] = 64,9^{\circ};$$

режим форсировки из номинального:

$$\alpha_{\phi} = \arccos [2 \cdot \cos(\alpha_{\text{НОМ}})]; \quad (2.2)$$

$$\alpha_{\phi} = \arccos [2 \cdot \cos(64,9)] = 32^{\circ};$$

режим гашения поля из номинального:

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(\delta_{\text{ДОП}}) + X_{\gamma}]; \quad (2.3)$$

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(15) + 0,08] = 152,4^{\circ};$$

коэффициент гашения поля из номинального режима:

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(\alpha_{\text{ГН}}) - 0,5 X_{\gamma}}{\cos(\alpha_{\text{НОМ}}) - 0,5 X_{\gamma}}; \quad (2.4)$$

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(152,4) - 0,5 \cdot 0,08}{\cos(64,9) - 0,5 \cdot 0,08} = -2,41;$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				12
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из форсировки:

$$\alpha_{\text{ГФ}} = \arccos \left[ -\cos(\delta_{\text{доП}}) + 2X_{\gamma} \right]; \quad (2.5)$$

$$\alpha_{\text{ГФ}} = \arccos \left[ -\cos(15) + 2 \cdot 0,08 \right] = 143,7^{\circ};$$

коэффициент гашения поля из форсировки:

$$K_{\text{ГФ}} = \frac{\cos(\alpha_{\text{ГФ}}) - 0,5 \cdot 2X_{\gamma}}{\cos(\alpha_{\text{НОМ}}) - 0,5X_{\gamma}}; \quad (2.6)$$

$$K_{\text{ГФ}} = \frac{\cos(143,7) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,08}{\cos(64,9) - 0,5 \cdot 0,08} = -2,31.$$

Значения напряжений и токов в относительных единицах для построения внешних характеристик:

номинальный режим:

$$I_{d \text{ НОМ}}^* = X_{\gamma}; \quad (2.7)$$

$$I_{d \text{ НОМ}}^* = 0,08 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ НОМ}}^* = \cos(\alpha_{\text{НОМ}}) - 0,5 I_{d \text{ НОМ}}^*; \quad (2.8)$$

$$U_{d \text{ НОМ}}^* = \cos(64,9) - 0,5 \cdot 0,08 = 0,384 \text{ (о.е.);}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				13
Изм.	Лист	№ докц.	Подпись	Дата		

режим потолочного возбуждения:

$$I_{d\Pi}^* = X_\gamma; \quad (2.9)$$

$$I_{d\Pi}^* = 0,08 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 I_{d\Pi}^*; \quad (2.10)$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,08 = 0,96 \text{ (о.е.)};$$

режим форсировки установившийся:

$$I_{d\Phi}^* = 2X_\gamma; \quad (2.11)$$

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(\alpha_\Phi) - 0,5 I_{d\Phi}^*; \quad (2.12)$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(32) - 0,5 \cdot 0,16 = 0,768 \text{ (о.е.)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				14
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из номинального:

$$I_{d_{ГН}}^* = X_{\gamma}; \quad (2.13)$$

$$I_{d_{ГН}}^* = 0,08 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d_{ГН}}^* = \cos(\alpha_{ГН}) - 0,5 I_{d_{ГН}}^*; \quad (2.14)$$

$$U_{d_{ГН}}^* = \cos(152,4) - 0,5 \cdot 0,08 = -0,926 \text{ (о.е.)};$$

режим гашения поля из форсировки:

$$I_{d_{ГФ}}^* = 2X_{\gamma}; \quad (2.15)$$

$$I_{d_{ГФ}}^* = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d_{ГФ}}^* = \cos(\alpha_{ГФ}) - 0,5 I_{d_{ГФ}}^*; \quad (2.16)$$

$$U_{d_{ГФ}}^* = \cos(143,7) - 0,5 \cdot 0,16 = -0,886 \text{ (о.е.)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				15
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		





$$I_{\text{НОМ}} = \frac{258,8}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 9,49 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по [2]:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} P_{\text{НОМ}}^2\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} Q_{\text{НОМ}}^2 + X_{\Gamma}^2\right)^2}; \quad (2.18)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная активная мощность генератора, МВт;

$Q_{\text{НОМ}}$  – номинальная реактивная мощность генератора, МВАр;

$X_{\Gamma}$  – индуктивное сопротивление генератора, приведенное к напряжению 15,75 кВ и определяемое по выражению:

$$X_{\Gamma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} X_d''; \quad (2.19)$$

где  $X_d''$  – сверхпереходное сопротивление генератора, о.е.;

$$X_{\Gamma} = \frac{15,75^2}{258,8} \cdot 0,191 = 0,183 \text{ (Ом)};$$

полное сопротивление генератора равно:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 220^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 137^2 + 0,183\right)^2} = 1,07 \text{ (Ом)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				17
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		

номинальная ЭДС генератора:

$$E_{\text{НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \cdot Z \cdot \sqrt{3}; \quad (2.20)$$

$$E_{\text{НОМ}} = 9,49 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{3} = 17,54 \text{ (кВ)}.$$

Рассмотрим режим короткого замыкания и определим критическое сопротивление:

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 15,75 кВ:

$$X_{\text{Т. бл}} = \frac{u_{\text{к\%}}}{100} \frac{U_{\text{Т. бл. нн}}^2}{S_{\text{Т. бл}}}; \quad (2.21)$$

где  $u_{\text{к\%}}$  – напряжение короткого замыкания, %;

$U_{\text{Т. бл. нн}}$  – номинальное напряжение низкой стороны трансформатора, кВ;

$S_{\text{Т. бл}}$  – номинальная мощность блочного трансформатора, МВА;

$$X_{\text{Т. бл}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{250} = 0,109 \text{ (Ом)}.$$

Схема замещения цепи генератор-энергосистема показана на рисунке 2.1.3.

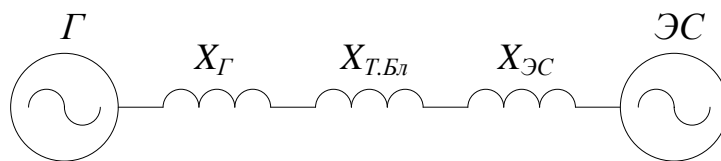


Рисунок 2.1.3 – Схема замещения цепи генератор-энергосистема

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				18
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Рассмотрим КЗ на выводах ВН блочного трансформатора, тогда сопротивление от генератора до точки КЗ:

$$X_{\text{КЗ}} = X_{\text{Т.бл}}; \quad (2.22)$$

$$X_{\text{КЗ}} = 0,109 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в данном случае [2]:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{2E_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{КЗ}}};$$

где

$$Z_{\text{КЗ}} = X_{\text{КЗ}} + X_{\Gamma}; \quad (2.23)$$

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,109 + 0,183 = 0,292 \text{ (Ом)};$$

тогда ток КЗ равен:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{2 \cdot 17,54}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 69,42 \text{ (кА)};$$

базисный ток:

$$I_{\text{б}} = \frac{I_d}{I_{d \text{ ном}}};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				19
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

$$I_{\sigma} = \frac{2\,949}{0,08} = 36,86 \text{ (кА)};$$

базисное напряжение:

$$U_{\sigma} = \frac{U_d}{* U_{d \text{ ном}}};$$

$$U_{\sigma} = \frac{245}{0,384} = 638,02 \text{ (В)};$$

ток ротора в режиме форсировки:

$$I_p = 2I_d;$$

$$I_p = 2 \cdot 2\,949 = 5\,898 \text{ (А)};$$

ток ротора в режиме форсировки в относительных единицах:

$$I'_p = \frac{I_p}{I_{\sigma}};$$

$$I'_p = \frac{5\,898}{36\,860} = 0,16 \text{ (о.е.)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки:

$$U_p = I_p \frac{U_d}{I_d};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				20
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

$$U_p = 5\,898 \cdot \frac{245}{2949} = 490 \text{ (В)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки в относительных единицах:

$$U'_p = \frac{U_p}{U_{\sigma}};$$

$$U'_p = \frac{490}{638,02} = 0,768 \text{ (о.е.)};$$

угол в режиме форсировки:

$$\alpha_{\phi} = \arccos [U'_p + 0,5 I'_p];$$

$$\alpha_{\phi} = \arccos [0,768 + 0,5 \cdot 0,16] = 32^{\circ};$$

напряжение на выводах генератора в режиме форсировки:

$$U_{\Gamma} = 2E_{\text{НОМ}} \frac{X_{\text{КЗ}}}{X_{\text{КЗ}} + X_{\Gamma}};$$

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot 17,54 \cdot \frac{0,109}{0,109 + 0,183} = 13,12 \text{ (кВ)}.$$

		Поснова А.Д.			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	Лист
		Гольдштейн М.Е.				21
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора:

$$X_{кр} = \frac{X_{Г}}{\frac{2E_{НОМ}}{U_{НОМ}} - 1};$$

$$X_{кр} = \frac{0,183}{\frac{2 \cdot 17,54}{15,75} - 1} = 0,149 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{кз}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. Данная зависимость показана на рисунке 2.1.4.

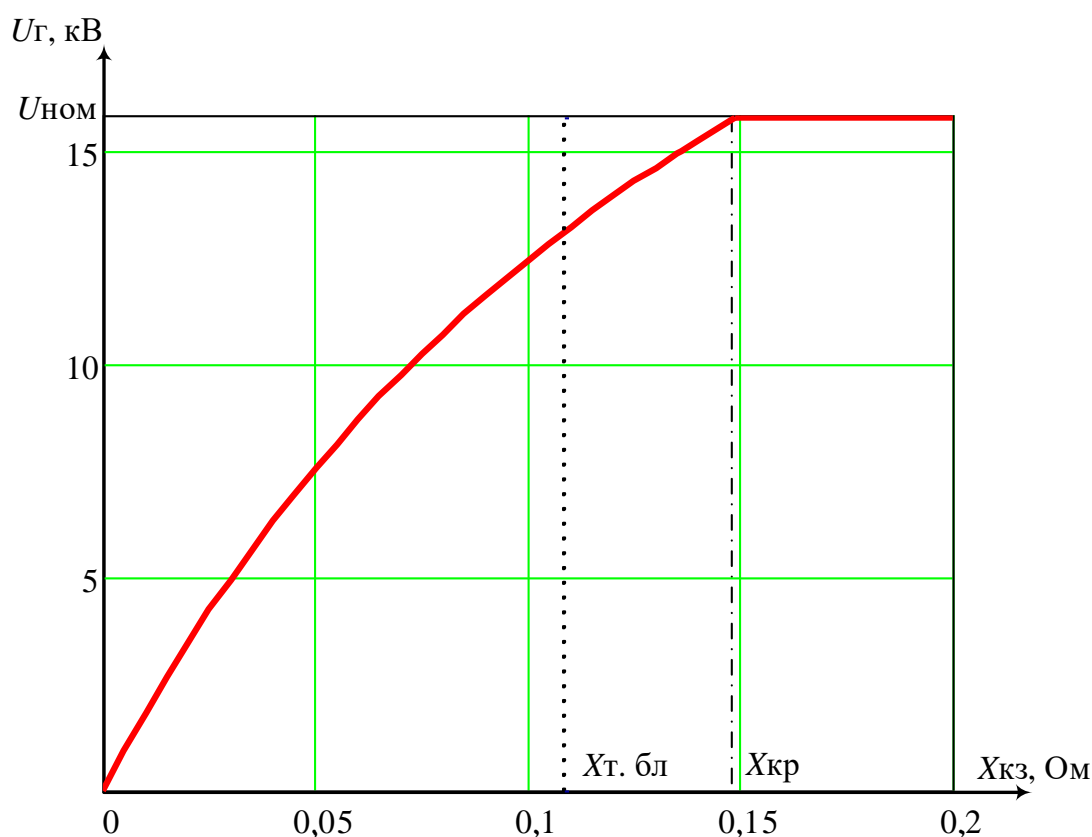


Рисунок 2.1.4 – Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ для СТН





Таблица 4 – Основные технические характеристики СТС-2В-270-3200-2,5

Длительно допустимое напряжение системы возбуждения, В	270
Длительно допустимый ток системы возбуждения, А	3 200
Кратность форсировки по напряжению, $K_{П}$	2,5
Кратность форсировки по току, $K_i$	2,0
Длительность режима форсировки, с, не более	20
Тип охлаждения тиристорного преобразователя	Принудительное водяное
Количество преобразовательно-регулирующих каналов	2
Число параллельных тиристорov в плече	1
Марка тиристора	T283-2500-32
Верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, °С	40

Силовая схема тиристорной секции состоит из двух силовых тиристорных мостов. Тиристорный мост представляет собой трехфазный полностью управляемый выпрямитель. Он состоит из 3-х фаз, каждая фаза включает 2 противофазных плеча. В каждом плече имеется тиристор, силовой быстродействующий предохранитель. Общий сигнал о срабатывании предохранителей моста поступает в СУР. Импульсы управления на тиристоры приходят от блока выходного устройства (БУВ). В каждой фазе моста установлены датчики тока. Параллельно тиристору установлена индивидуальная RC-цепь и цепь сигнализации. Общие демпфирующие RC-цепи включены на шины переменного тока моста. Назначение RC-цепей - демпфирование перенапряжений, возникающих при выключении тиристора [17].

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				24
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения СТС-2В-270-3200-2,5 представлена на рисунке 2.2.2.

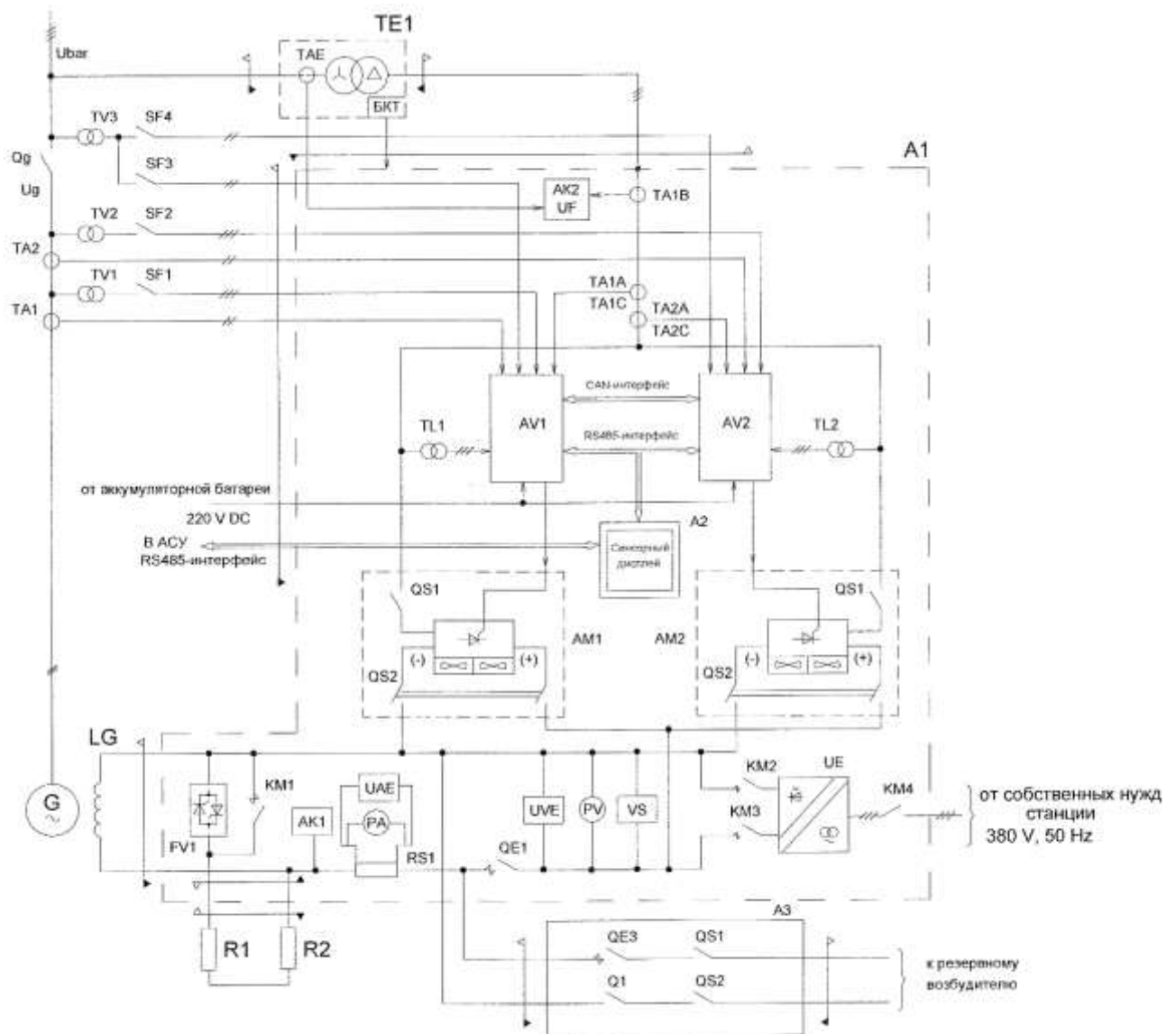


Рисунок 2.2.2 - Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения СТС-2В-270-3200-2,5

Описание элементов функциональной схемы на рис.2.2.2:

TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:

ТАЕ - Трансформаторы тока;

БКТ - Блок контроля температуры.

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

25

А1 - Щит системы возбуждения в составе:

AV1 и AV2 - Автоматические регуляторы тока;

KM2,3,4 – Контакторы;

SF1,2,3,4 - Автоматические выключатели;

RS1 – Шунт;

PA – Амперметр;

PV – Вольтметр;

TA1 и TA2 (ф.А, В, С) - Трансформаторы тока;

TL1 и TL2 - Трансформаторы собственных нужд;

UE - Устройство начального возбуждения;

UF - Устройство защит;

UAE, UVE - Измерительные преобразователи;

QS1, QS2 – Разъединители.

А3 - Шкаф силового ввода в составе:

Q1, QS1, QS2 - ручные разъединители.

Силовые цепи рабочей системы возбуждения:

FV1 - тиристорный разрядник;

VS - тиристорный короткозамыкатель;

KM1 - контактор шунтирования ротора;

R1 и R2 - разрядное сопротивление;

QE1 - автомат гашения поля;

Qg - генераторный выключатель;

G – генератор;

LG - обмотка возбуждения.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				26
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Для определения сопротивления сети, с которой связан преобразователь, необходимо найти сопротивления генератора и трансформатора возбуждения. Для расчета токов короткого замыкания потребуется рассчитать сопротивление блочного трансформатора. Схема замещения сети, с которой связан преобразователь, представлена на рисунке 2.2.3.

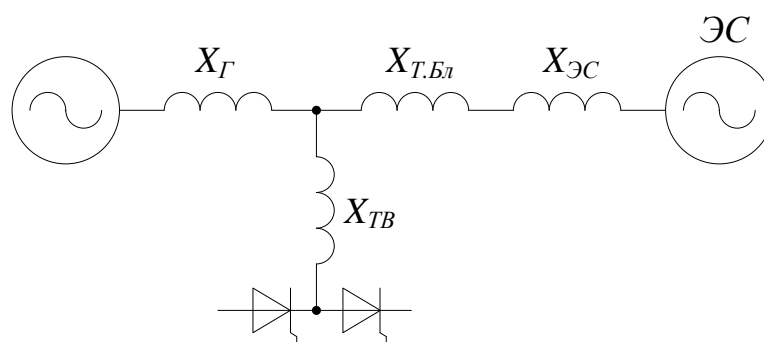


Рисунок 2.2.3 – Схема замещения сети, с которой связан преобразователь

Сопротивление генератора, приведенное к напряжению 270 В:

$$X_{Г(270)} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \cdot X_d'' \cdot \frac{U_d^2}{U_{НОМ}^2}; \quad (2.24)$$

где  $U_d$  – номинальное напряжение тиристорного преобразователя, кВ;

$$X_{Г(270)} = \frac{15,75^2}{258,8} \cdot 0,191 \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 270 В:

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				27
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

$$X_{\text{т. бл}}(270) = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{т. бл. нн}}^2}{S_{\text{т. бл}}} \cdot \frac{U_d^2}{U_{\text{т. бл. нн}}^2}; \quad (2.25)$$

$$X_{\text{т. бл}}(270) = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{250} \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 3,21 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 15,75 кВ по формуле (2.21):

$$X_{\text{т. бл}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{250} = 0,109 \text{ (Ом)};$$

Для определения сопротивления трансформатора возбуждения производится его выбор. Мощность трансформатора возбуждения по [21]:

$$S_{\text{т. в.}} = \frac{I_d U_d}{\cos(70)}; \quad (2.26)$$

где 70 – угол, взятый с запасом, при котором система возбуждения работает в номинальном режиме, град.эл.;

$$S_{\text{т. в.}} = \frac{3 \cdot 200 \cdot 270}{\cos(70)} = 2,53 \text{ (МВА)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				28
Изм.	Лист	№ докц.	Подпись	Дата		

К установке принимается трансформатор ТСЗП-4000/15,75 – трансформатор сухой защищенный для преобразователей, технические характеристики которого взяты согласно каталогу [7] и представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики трансформатора ТСЗП-4000/15,75

$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	$U_{\text{ВН}}$ , кВ	$U_d$ , кВ	$u_k$ , %
4	15,75	0,27	6,5

Сопротивление трансформатора возбуждения, приведенное к стороне НН:

$$X_{\text{Т.В.}} = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{\text{Т.В.НН}}^2}{S_{\text{Т.В.}}}; \quad (2.27)$$

$$X_{\text{Т.В.}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{0,27^2}{4} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление сети, с которой связан преобразователь, приведенное к напряжению 270 В:

$$X_{\gamma(270)} = X_{\text{Т.В.}} + X_{\Gamma(270)}; \quad (2.28)$$

$$X_{\gamma(270)} = 1,19 \cdot 10^{-3} + 5,37 \cdot 10^{-5} = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

		Поснова А.Д.			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	Лист
		Гольдштейн М.Е.				29
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Для определения сопротивления  $X_\gamma$  в относительных единицах, необходимо найти:

фазное напряжение выпрямителя:

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d - \frac{3}{\pi} X_{\gamma(270)} I_d; \quad (2.29)$$

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 270 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,949 = 111,94 \text{ (В)};$$

ЭДС преобразователя:

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} U_d}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}}; \quad (2.30)$$

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 270}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 199,93 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе:

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{2 X_{\gamma(270)}}; \quad (2.31)$$

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 111,94}{2 \cdot 1,24 \cdot 10^{-3}} = 110,7 \text{ (кА)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				30
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		



ток в обмотке возбуждения в относительных единицах:

$$I_d^* = \frac{I_d}{I_{2km}}; \quad (2.32)$$

$$I_d^* = \frac{2\,949}{110\,700} = 0,027 \text{ (о.е.)};$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах:

$$X_\gamma = \frac{X_{\gamma(270)} I_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{E_{2л}}; \quad (2.33)$$

$$X_\gamma = \frac{1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,949 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{199,93} = 0,022 \text{ (о.е.)};$$

Углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,022 \cdot (2,5 - 1)}{2,5} \right] = 66^\circ;$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_\phi = \arccos [2 \cdot \cos(66)] = 35,57^\circ;$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				31
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{ГН} = \arccos[-\cos(15) + 0,022] = 160,66^\circ;$$

коэффициент гашения поля из номинального режима по формуле (2.4):

$$K_{ГН} = \frac{\cos(160,66) - 0,5 \cdot 0,022}{\cos(66) - 0,5 \cdot 0,022} = -2,41;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{ГФ} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,022] = 157,1^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{ГФ} = \frac{\cos(157,1) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,022}{\cos(66) - 0,5 \cdot 0,022} = -2,39.$$

Значения напряжений и токов в относительных единицах для построения внешних характеристик:

номинальный режим по формулам (2.7) и (2.8):

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,022 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ном}}^* = \cos(66) - 0,5 \cdot 0,022 = 0,396 \text{ (о.е.);}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				32
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

режим потолочного возбуждения по формулам (2.9) и (2.10):

$$I_{d\Pi}^* = 0,022 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,022 = 0,99 \text{ (о.е.);}$$

режим форсировки установившийся по формулам (2.11) и (2.12):

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,022 = 0,044 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(35,57) - 0,5 \cdot 0,044 = 0,791 \text{ (о.е.);}$$

режим гашения поля из номинального по формулам (2.13) и (2.14):

$$I_{dГН}^* = 0,022 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГН}^* = \cos(160,66) - 0,5 \cdot 0,022 = -0,955 \text{ (о.е.);}$$

режим гашения поля из форсировки по формулам (2.15) и (2.16):

$$I_{dГФ}^* = 2 \cdot 0,022 = 0,044 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГФ}^* = \cos(157,1) - 0,5 \cdot 0,044 = -0,944 \text{ (о.е.).}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				33
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Представим внешние характеристики СТС генератора ТЗВ-220-2 на рисунке 2.2.4.

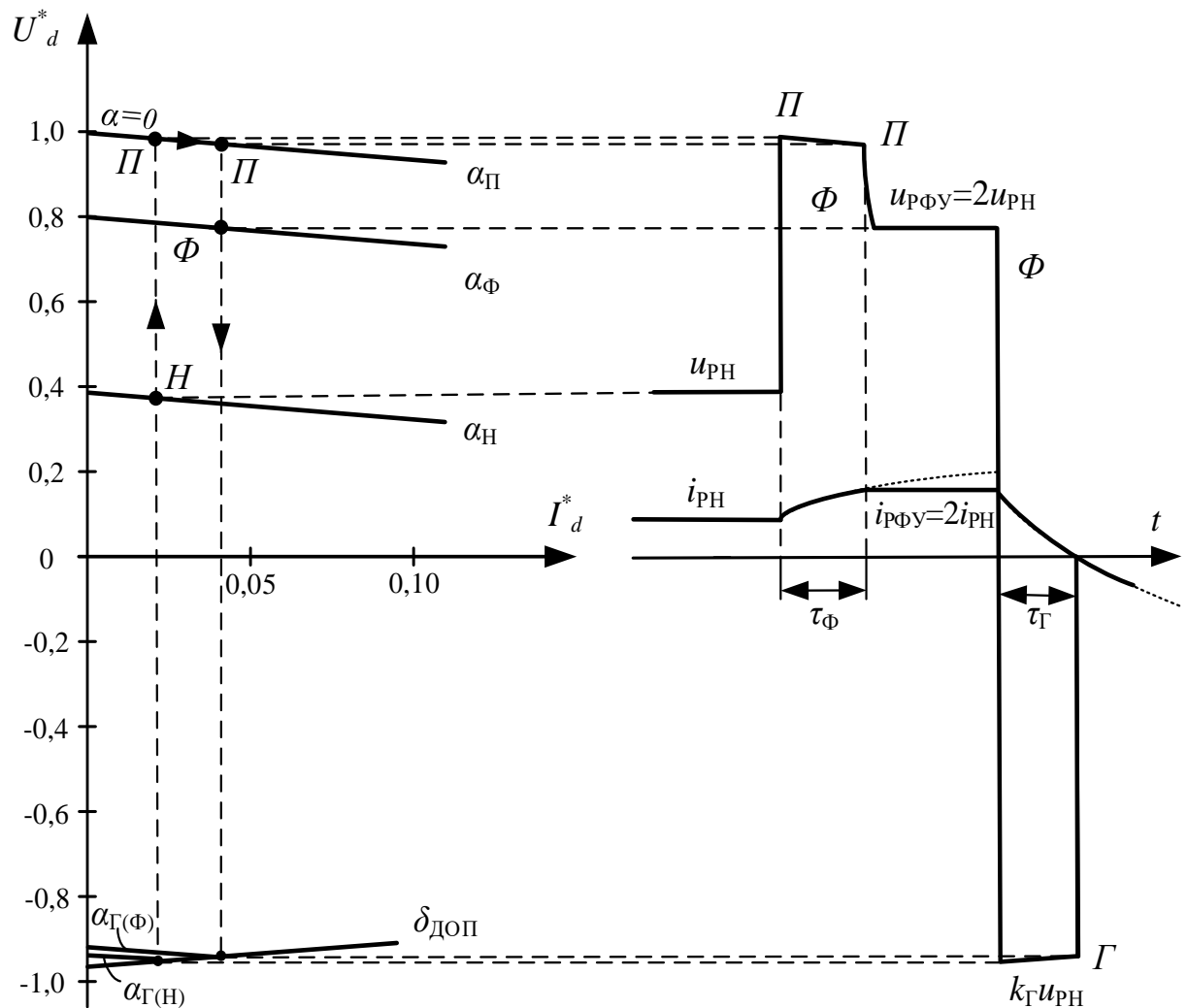


Рисунок 2.2.4 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования системы тиристорной самовозбуждения СТС-2В-270-3200-2,5

Произведем расчет номинального режима работы генератора:

номинальный ток в статорной обмотке генератора по формуле (2.17):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{258,5}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 9,49 \text{ (кА)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				34
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 220^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 137^2 + 0,183\right)^2} = 1,07 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 9,49 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{3} = 17,54 \text{ (кВ)}.$$

Рассмотрим КЗ на выводах ВН блочного трансформатора, тогда сопротивление от генератора до точки КЗ по формуле (2.22):

$$X_{\text{КЗ}} = 0,109 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{E_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{КЗ}}}; \quad (2.34)$$

где по формуле (2.23):

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,109 + 0,183 = 0,292 \text{ (Ом)};$$

тогда ток КЗ будет равен:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{17,54}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 34,68 \text{ (кА)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				35
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		

напряжение на выводах генератора:

$$U'_{\Gamma} = E_{\text{НОМ}} - I_{\text{КЗ}} \cdot X_{\Gamma} \cdot \sqrt{3}; \quad (2.35)$$

$$U'_{\Gamma} = 17,54 - 34,68 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 6,55 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется как:

$$X'_{\text{кр}} = \frac{X_{\Gamma}}{\frac{E_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} - 1}; \quad (2.36)$$

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,183}{\frac{17,54}{15,75} - 1} = 1,604 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{КЗ}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.35) строится график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{КЗ}}$ ) в момент возникновения КЗ, когда форсировка не началась. График показан на рисунках 2.2.5 - 2.2.7.

Далее необходимо построить график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{КЗ}}$ ) во время форсировки. Так как напряжение на выводах генератора при КЗ уменьшается, то уменьшится и ЭДС тиристорного преобразователя, которая определяется по следующей формуле:

$$E_2 = \frac{U'_{\Gamma}}{K_{\text{T.ТВ}}}; \quad (2.37)$$

где  $K_{\text{T.ТВ}}$  – коэффициент трансформации трансформатора возбуждения:

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				36
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

$$K_{Т.ТВ} = \frac{U_{ТВ.ВН}}{U_{ТВ.НН}}; \quad (2.38)$$

$$K_{Т.ТВ} = \frac{15,75}{0,27} = 58,33.$$

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{6\,550}{58,33} = 112,29 \text{ (В)}.$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя уменьшается, то уменьшается и напряжение тиристорного преобразователя при номинальном токе возбуждения, но такое недопустимо, так как последует снижение тока обмотки ротора, поэтому уменьшаем угол  $\alpha$  до 0 град.эл., т.е. переходим в режим форсировки:

$$u_d = 2,34 \cdot E_2 \cdot \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X_{\gamma(270)} \cdot I_{d.\text{ном}}; \quad (2.39)$$

$$u_d = 2,34 \cdot 112,29 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,949 = 259,27 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда угол  $\alpha$  равен 0 град.эл.:

$$i_d = \frac{u_d}{R_{\text{обм.рот}}}; \quad (2.40)$$

где  $R_{\text{обм.рот}}$  - омическое сопротивление обмотки ротора, Ом.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				37
Изм.	Лист	№ докц.	Подпись	Дата		

Омическое сопротивление обмотки ротора:

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{U_{d.\text{НОМ}} - \Delta u_{\text{щкка}}}{I_{d.\text{НОМ}}}; \quad (2.41)$$

где  $\Delta u_{\text{щкка}}$  - падение напряжения на щеточно-контактном аппарате, равное 3В;

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{245 - 3}{2\,949} = 0,082 \text{ (Ом)};$$

тогда ток обмотки ротора будет равен:

$$i_d = \frac{259,27}{0,082} = 3\,162 \text{ (А)}.$$

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора:

$$E_{Г(1)} = K_f \cdot i_d; \quad (2.42)$$

где  $K_f$  - коэффициент, учитывающий зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения. Он определяется по следующей формуле:

$$K_f = \frac{E_{\text{НОМ}}}{I_{d.\text{НОМ}}}; \quad (2.43)$$

$$K_f = \frac{17\,544}{2\,949} = 5,95 \left(\frac{\text{В}}{\text{А}}\right).$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				38
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		



Тогда новое значение ЭДС генератора будет равно:

$$E_{\Gamma(1)} = 5,95 \cdot 3\,162 = 18\,810 \text{ (В)}.$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ. В результате напряжение на выводах статорной обмотки генератора будет определяться по формуле:

$$U'_{\Gamma(1)} = E_{\Gamma(1)} - I_{\text{кз}(1)} \cdot X_{\Gamma} \cdot \sqrt{3};$$

где  $I_{\text{кз}(1)}$  - ток трехфазного короткого замыкания при новом значении ЭДС генератора:

$$I_{\text{кз}(1)} = \frac{E_{\Gamma(1)}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{кз}}};$$

$$I_{\text{кз}(1)} = \frac{18\,810}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 37\,191 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно:

$$U'_{\Gamma(1)} = 18\,810 - 37\,191,6 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 7\,022 \text{ (В)}.$$

Полученное напряжение  $U'_{\Gamma(1)}$  больше напряжения на выводах генератора в момент возникновения КЗ  $U_{\Gamma}$ . Это показывает, что форсировка поднимает напряжение на выводах генератора. Но так как напряжение стало больше, то и ЭДС преобразователя станет больше, т.е. процесс цикличен и итерационен. Во время форсировки АРВ увеличивает напряжение преобразователя путем уменьшения угла  $\alpha$  до 0 град.эл., поэтому возрастает ток в обмотке ротора  $i_d$ , это приводит к

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				39
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

увеличению ЭДС генератора  $E_T$  и соответственно напряжения на выводах  $U_T$ . Увеличение напряжения на выводах увеличивает ЭДС преобразователя  $E_2$  и соответственно напряжение преобразователя  $u_d$ , что способствует увеличению тока в обмотке ротора  $i_d$  до большего значения. То есть:  $\alpha=0 \Rightarrow u_d \uparrow \Rightarrow i_d \uparrow \Rightarrow E_T \uparrow \Rightarrow U_T \uparrow \Rightarrow E_2 \uparrow \Rightarrow u_d \uparrow \Rightarrow i_d \uparrow$ .

Это может продолжаться бесконечно, однако в составе системы возбуждения имеется блок ограничения тока ротора (БОР), который ограничивает ток ротора до двукратного значения номинального тока ротора согласно [10]. Для примера далее представлен расчет, по которому видно, что процесс действительно протекает так, как описано выше.

Так как напряжение на выводах генератора возросло до 7 022 В, то увеличится и ЭДС преобразователя (2.37):

$$E_{2(1)} = \frac{7\,022}{58,33} = 120,38 \text{ (В)}.$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя увеличивается, то возрастает и напряжение тиристорного преобразователя (2.39):

$$u_{d(1)} = 2,34 \cdot 120,38 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 3\,162 = 277,95 \text{ (В)}.$$

Тогда ток в обмотке ротора будет равен (2.40):

$$i_{d(1)} = \frac{277,95}{0,082} = 3\,390 \text{ (А)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				40
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора:

$$E_{Г(2)} = 5,95 \cdot 3\,390 = 20\,171 \text{ (В)}.$$

Ток трехфазного КЗ возрастет из-за увеличения ЭДС генератора (2.34):

$$I_{кз(2)} = \frac{20\,171}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 39\,882 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно по формуле (2.35):

$$U'_{Г(2)} = 20\,171 - 39\,882 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 7\,530 \text{ (В)}.$$

Для наглядности сведем полученные данные в таблицу 6.

Таблица 6 – Полученные данные по итерационному процессу

Значение Величина	Момент возникновения КЗ	1 итерация	2 итерация
$u_d$ , В	245	259,27	277,95
$i_d$ , А	2 949	3 162	3 390
$E_{Г}$ , В	17 544	18 810	20 171
$I_{кз}$ , А	34 680	37 191	39 882
$U_{Г}$ , В	6 550	7 022	7 530

Так как невозможно поднять ток ротора больше двукратного  $i_{d,max} = 2 \cdot I_{d,ном} = 2 \cdot 2949 = 5898$  (А), то это ограничение вводится в расчет. Изменяя место возникновения КЗ (в данном случае величина  $X_{КЗ}$ ), определим по ранее использованным формулам напряжение на выводах статора генератора в режиме форсировки.

Однако, при близких к генератору КЗ возникает резкое снижение напряжения на выводах генератора, причем такое, что ток возбуждения начинает снижаться с каждой итерацией. Это явление называется «лавиной напряжения», и в данном случае она возникает при  $X_{КЗ} = 0,098$  Ом. При сопротивлении 0,098 Ом или меньше напряжение на выводах упадет до нуля, и система возбуждения не сможет его восстановить.

Результаты расчета представлены в виде графика на рисунках 2.2.5-2.2.6.

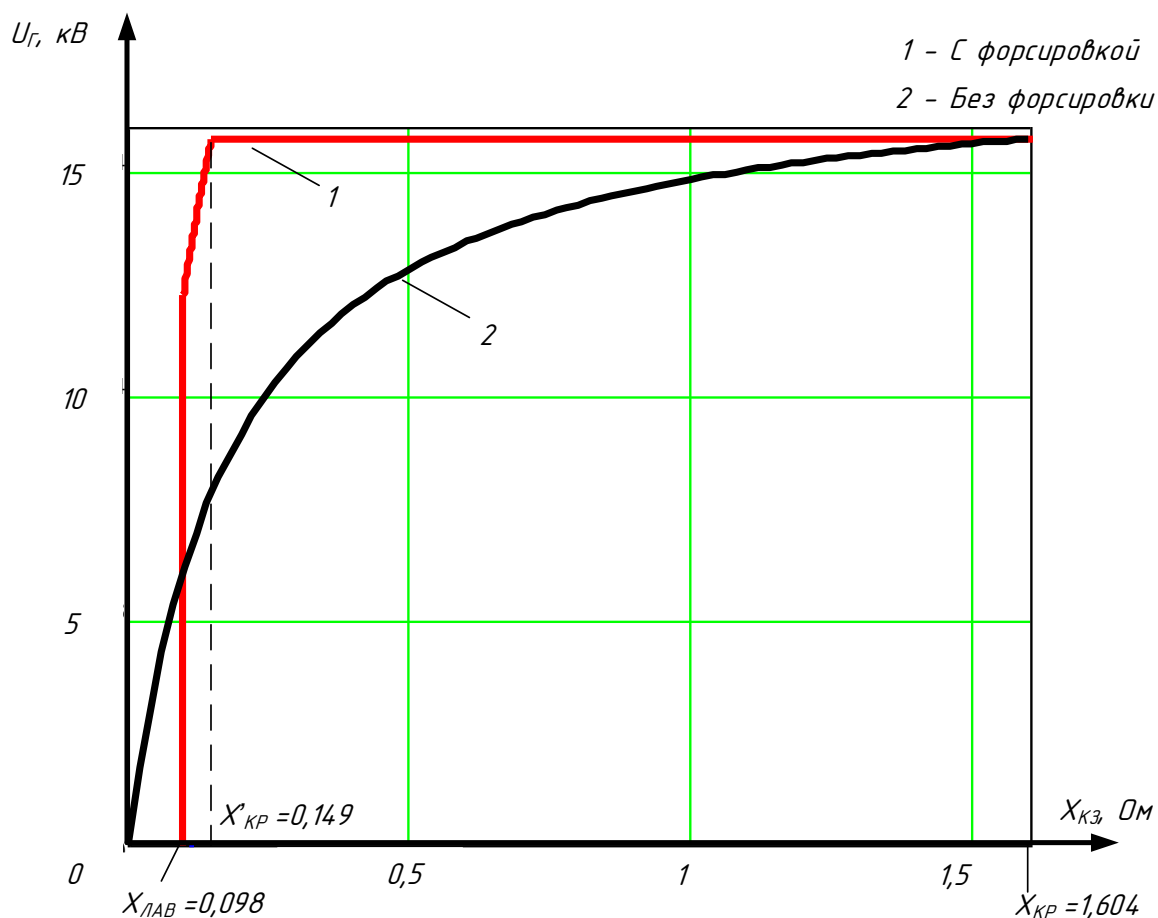


Рисунок 2.2.5 – Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{КЗ}=0..1,604$  (Ом)

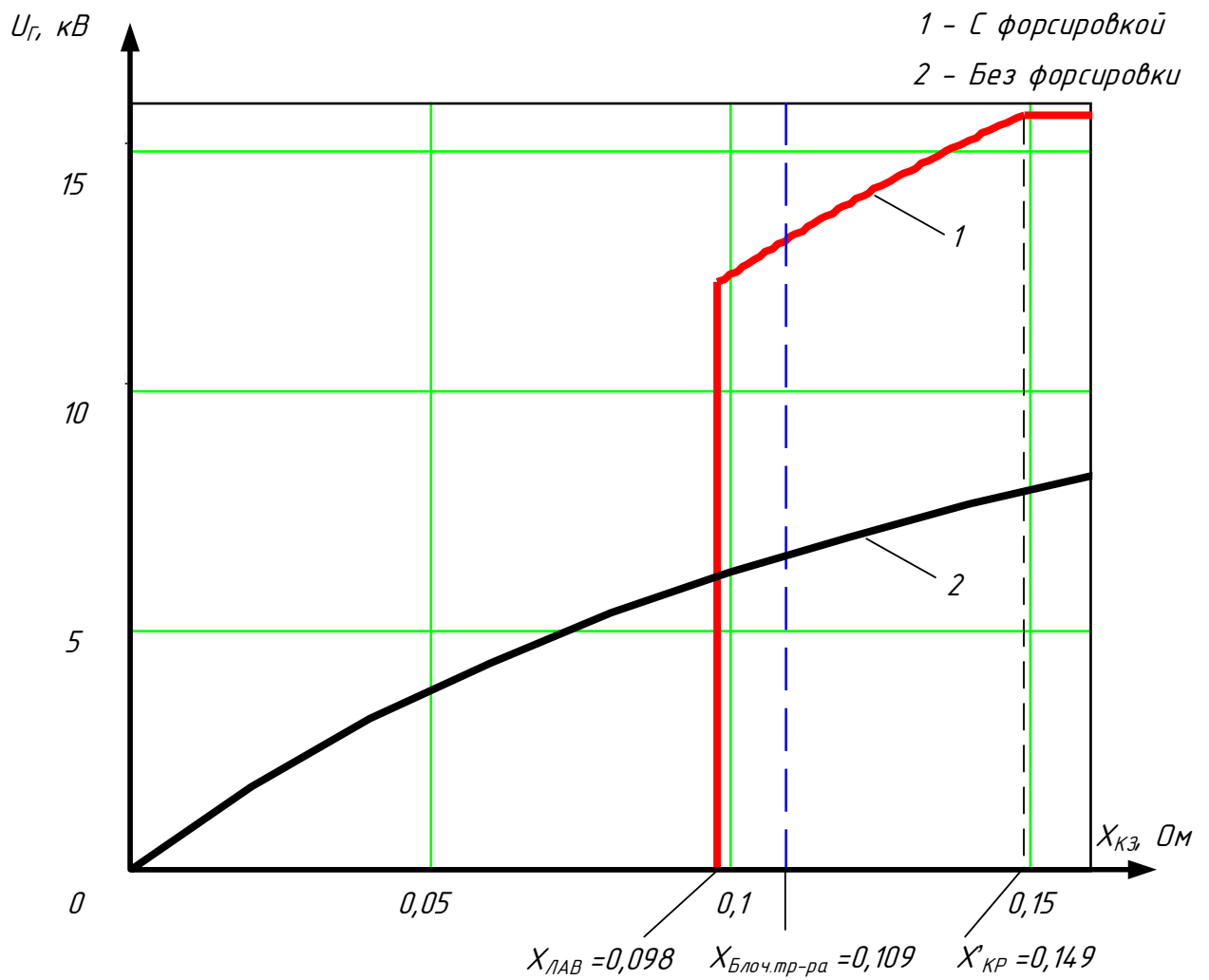


Рисунок 2.2.6 – Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{кз}=0..0,16$  (Ом)

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

43

На рисунке 2.2.7 приведем сравнение СТН и СТС.

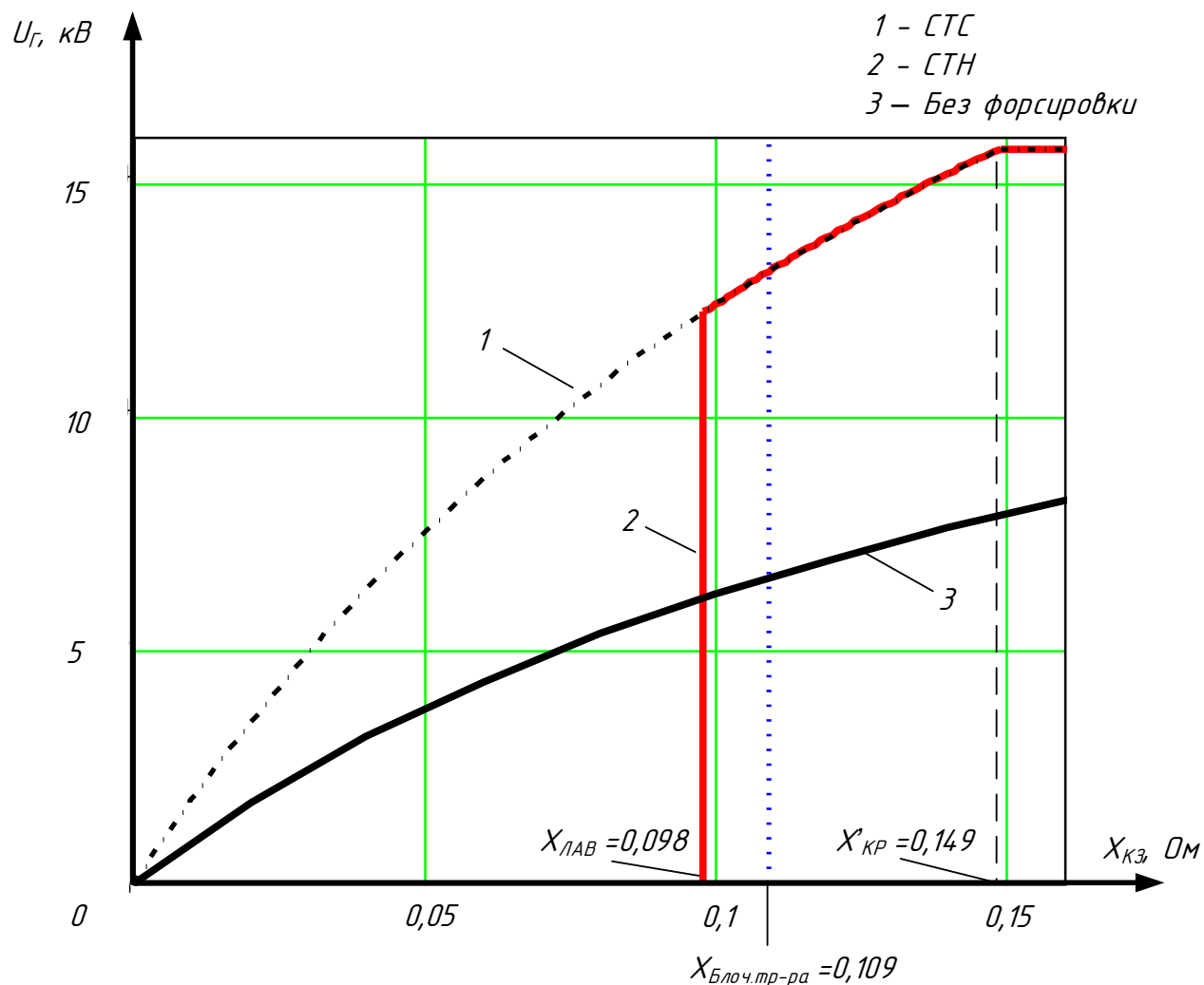


Рисунок 2.2.7 – Сравнение СТН и СТС

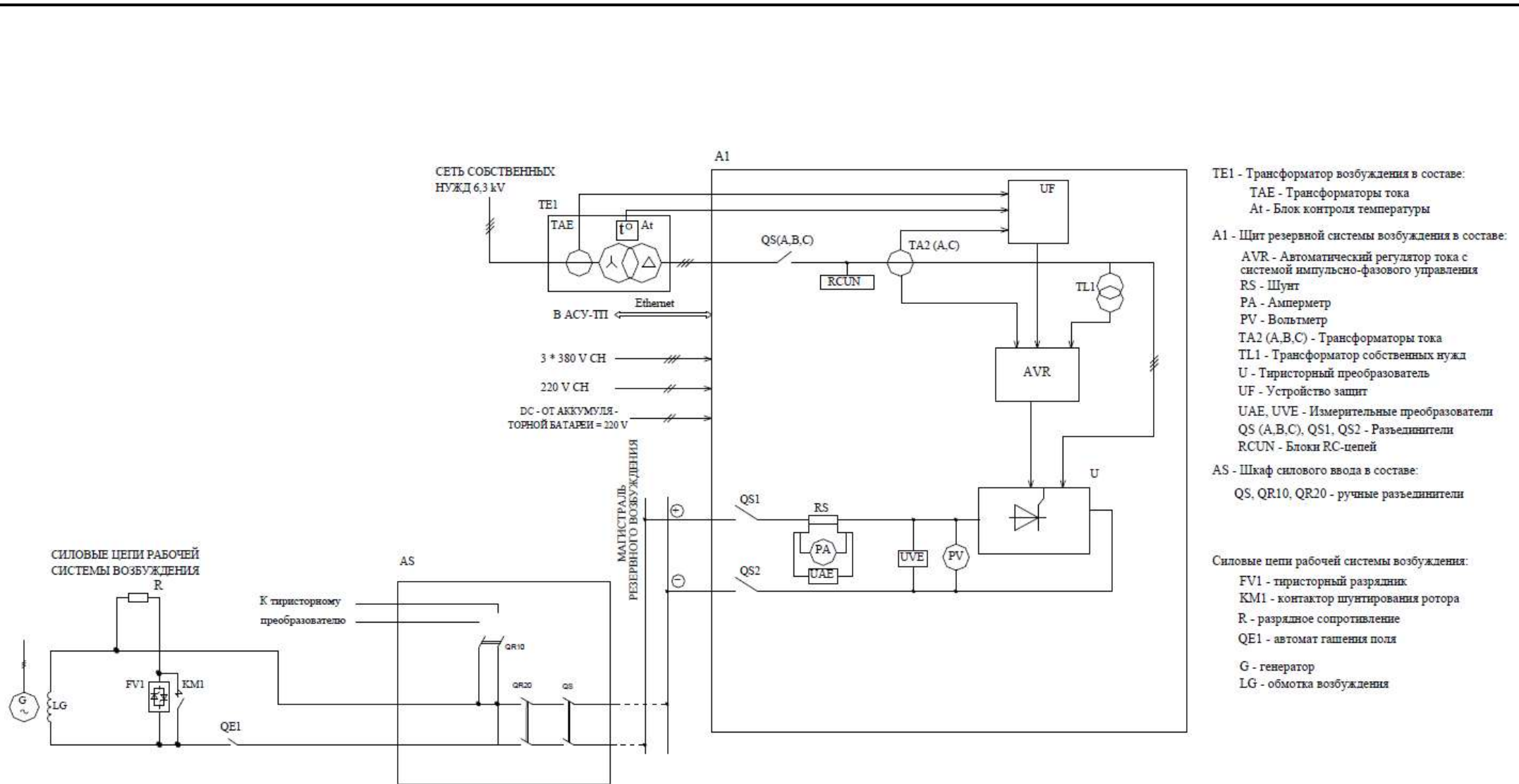
Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что СТН может восстановить напряжение на выводах генератора при более близких КЗ, чем СТС. Однако, надежность СТН ниже, чем СТС, так как СТН имеет вспомогательный генератор, который располагается на одном валу с основным генератором. Как известно, вращающиеся элементы требуют частого обслуживания, быстро изнашиваются, а также имеют низкие динамические параметры. С другой стороны, для генераторов такой мощности СТС будут дешевле, чем СТН.

### 2.3 Система тиристорная самовозбуждения резервная

Резервная система возбуждения предназначена для случаев, когда основная система возбуждения вследствие неисправности или технического обслуживания выведена из работы. В качестве такой системы выбирается СТСП-1В-270-3200-2 согласно каталогу [13]. Основные технические характеристики СТСП приведены в таблице 7, а функциональная схема представлена на рисунке 2.3.1.

Таблица 7 – Основные технические характеристики СТСП-1В-270-3200-2 согласно техническому описанию [18]

Длительно допустимое напряжение системы возбуждения, В	270
Длительно допустимый ток системы возбуждения, А	3 200
Кратность форсировки по напряжению, $K_{П}$	2,0
Кратность форсировки по току, $K_i$	2,0
Длительность режима форсировки, с, не более	20
Тип охлаждения тиристорного преобразователя	Принудительное водяное
Количество преобразовательно-регулирующих каналов	1
Число параллельных тиристоров в плече	1
Марка тиристора	T283-2500-32
Верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, °С	40



- TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:
  - TAE - Трансформаторы тока
  - At - Блок контроля температуры
- A1 - Щит резервной системы возбуждения в составе:
  - AVR - Автоматический регулятор тока с системой импульсно-фазового управления
  - RS - Шунт
  - PA - Амперметр
  - PV - Вольтметр
  - TA2 (A,B,C) - Трансформаторы тока
  - TL1 - Трансформатор собственных нужд
  - U - Тиристорный преобразователь
  - UF - Устройство защиты
  - UAE, UVE - Измерительные преобразователи
  - QS (A,B,C), QS1, QS2 - Разъединители
  - RCUN - Блоки RС-цепей
- AS - Шкаф силового ввода в составе:
  - QS, QR10, QR20 - ручные разъединители
- Силовые цепи рабочей системы возбуждения:
  - FV1 - тиристорный разрядник
  - KM1 - контактор шунтирования ротора
  - R - разрядное сопротивление
  - QE1 - автомат гашения поля
  - G - генератор
  - LG - обмотка возбуждения

Рисунок 2.3.1 – Схема функциональная системы тиристорной самовозбуждения резервной СТСР-1В-270-3200-2

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР



Силовая схема тиристорной секции состоит из одного силового тиристорного моста. Тиристорный мост представляет собой трехфазный полностью управляемый выпрямитель. Он состоит из 3-х фаз, каждая фаза включает в себя 2 противофазных плеча. В каждом плече имеется тиристор, силовой быстродействующий предохранитель. Общий сигнал о срабатывании предохранителей моста поступает в СУР. Импульсы управления на тиристоры приходят от блока выходного устройства (БУВ). В каждой фазе моста установлены датчики тока. Параллельно тиристорам установлена индивидуальная RC-цепь и цепь сигнализации. Основные демпфирующие RC-цепи включены на шины переменного тока моста. Назначение RC-цепей - демпфирование перенапряжений, возникающих при отключении тиристора [18].

Для генератора производится расчет и анализ режимов работы системы тиристорной резервной самовозбуждения (СТРС).

Исходные данные:

номинальный ток обмотки ротора генератора  $I_f=2\ 949\ \text{A}$ ;

номинальное напряжение обмотки ротора генератора  $U_f=245\ \text{V}$ ;

допустимый угол, при котором обеспечивается устойчивая работа возбудителя,  $\delta_{\text{доп}}=15^\circ$ .

Для определения сопротивления сети, с которой связан преобразователь, необходимо определить сопротивления энергосистемы, блочного трансформатора, генератора и трансформатора возбуждения.

		Поснова А.Д.			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	Лист
		Гольдштейн М.Е.				47
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Схема замещения сети, с которой связан преобразователь представлена на рисунке 2.3.2.

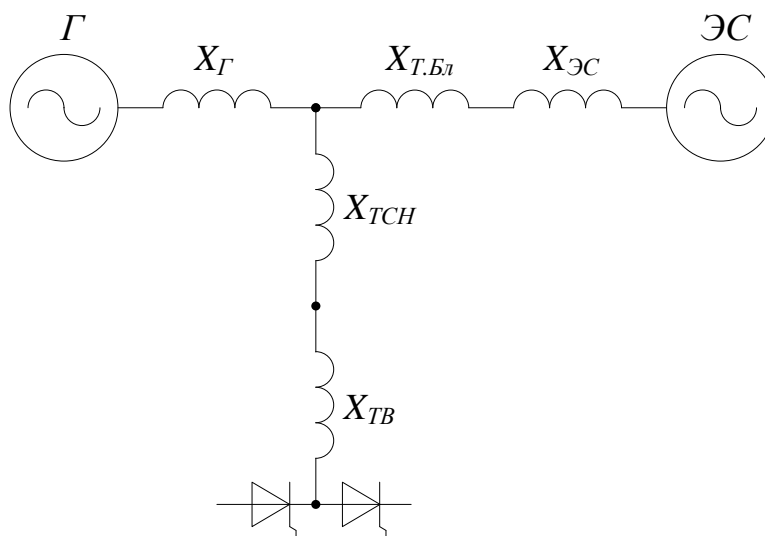


Рисунок 2.3.2 – Схема замещения сети, с которой связан преобразователь

Сопротивление генератора, приведенное к напряжению 270 В, по формуле (2.24):

$$X_{Г(270)} = \frac{15,75^2}{258,8} \cdot 0,191 \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 5,37 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 15,75 кВ, по формуле (2.21):

$$X_{Т.бл} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{250} = 0,109 \text{ (Ом)};$$

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 270 В по формуле (2.25):

$$X_{Т.бл(270)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{250} \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 3,21 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление трансформатора собственных нужд (ТСН), приведенное к стороне ВН:

$$X_{\text{ТСН}} = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_{\text{ТСН.ВН}}^2}{S_{\text{ТСН}}}; \quad (2.44)$$

$$X_{\text{ТСН}} = \frac{12,7}{100} \cdot \frac{15,75^2}{25} = 1,26 \text{ (Ом)};$$

сопротивление ТСН, приведенное к напряжению 270 В:

$$X_{\text{ТСН}(270)} = X_{\text{ТСН}} \frac{U_d^2}{U_{\text{ТСН.ВН}}^2}; \quad (2.45)$$

$$X_{\text{ТСН}(270)} = 1,26 \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Для определения сопротивления трансформатора возбуждения производится его выбор. Мощность трансформатора возбуждения по формуле (2.26):

$$S_{\text{Т.В.}} = \frac{270 \cdot 3200}{\cos(70)} = 2,53 \text{ (МВА)}.$$

Выбирается трансформатор ТСЗП-4000/6,3 – трансформатор сухой защищенный для возбудителей, выполненный по заказу, так как напряжение вторичной обмотки не входит в ряд стандартных значений напряжения.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				49
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Таблица 8 – Технические характеристики трансформатора ТСЗП-4000/6,3 [7]

$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	$U_{\text{ВН}}$ , кВ	$U_d$ , кВ	$u_k$ , %
4	6,3	0,27	5,4

Сопротивление трансформатора возбуждения, приведенное к стороне НН по формуле (2.27):

$$X_{\text{Т.В.}} = \frac{5,4}{100} \cdot \frac{0,27^2}{4} = 9,84 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Далее определяется сопротивление сети, с которой связан преобразователь, приведенное к напряжению 270 В по формуле:

$$X_{\gamma(270)} = X_{\text{Т.В.}} + X_{\text{ТСН}(270)} + X_{\Gamma(270)};$$

$$X_{\gamma(270)} = 9,84 \cdot 10^{-4} + 3,7 \cdot 10^{-4} + 5,37 \cdot 10^{-5} = 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

Для определения сопротивления  $X_{\gamma}$  в относительных единицах, необходимо определить:

фазное напряжение выпрямителя по формуле (2.29):

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 270 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 949 = 111,46 \text{ (В)};$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				50
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

ЭДС преобразователя по формуле (2.30):

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 270}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 199,93 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе по формуле (2.31):

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 111,46}{2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3}} = 96,95 \text{ (кА)};$$

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах по формуле (2.32):

$$I_d^* = \frac{2 \ 949}{96 \ 950} = 0,03 \text{ (о.е.)};$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах по формуле (2.33):

$$X_\gamma = \frac{1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \ 949 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{199,93} = 0,025 \text{ (о.е.)};$$

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,025 \cdot (2 - 1)}{2} \right] = 59,6^\circ,$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2)

$$\alpha_\phi = \arccos [2 \cdot \cos(59,6)] = 9,1^\circ;$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				51
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos[-\cos(15) + 0,025] = 160,1^\circ;$$

коэффициент гашения поля из номинального режима по формуле (2.4):

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(160,1) - 0,5 \cdot 0,025}{\cos(59,6) - 0,5 \cdot 0,025} = -1,93;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\text{ГФ}} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,025] = 156,2^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\text{ГФ}} = \frac{\cos(156,2) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,025}{\cos(59,6) - 0,5 \cdot 0,025} = -1,91.$$

Определяются значения напряжений и токов в относительных единицах для построения внешних характеристик:

номинальный режим по формулам (2.7) и (2.8):

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,025 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ном}}^* = \cos(59,6) - 0,5 \cdot 0,025 = 0,494 \text{ (о.е.);}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				52
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

режим потолочного возбуждения по формулам (2.9) и (2.10):

$$I_{d\Pi}^* = 0,025 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,025 = 0,987 \text{ (о.е.);}$$

режим форсировки установившийся по формулам (2.11) и (2.12):

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,025 = 0,05 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(9,1) - 0,5 \cdot 0,05 = 0,987 \text{ (о.е.);}$$

режим гашения поля из номинального по формулам (2.13) и (2.14):

$$I_{dГН}^* = 0,025 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГН}^* = \cos(160,1) - 0,5 \cdot 0,025 = -0,953 \text{ (о.е.);}$$

режим гашения поля из форсировки по формулам (2.15) и (2.16):

$$I_{dГФ}^* = 2 \cdot 0,025 = 0,05 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГФ}^* = \cos(156,2) - 0,5 \cdot 0,05 = -0,94 \text{ (о.е.).}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				53
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Далее производится расчет номинального режима работы генератора:  
номинальный ток в статорной обмотке генератора по формуле (2.17):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{258,8}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 9,49 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18)

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 220^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 137^2 + 0,183\right)^2} = 1,07 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 9,49 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{3} = 17,54 \text{ (кВ)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				54
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		



Покажем внешние характеристики СТРС на рисунке 2.3.3.

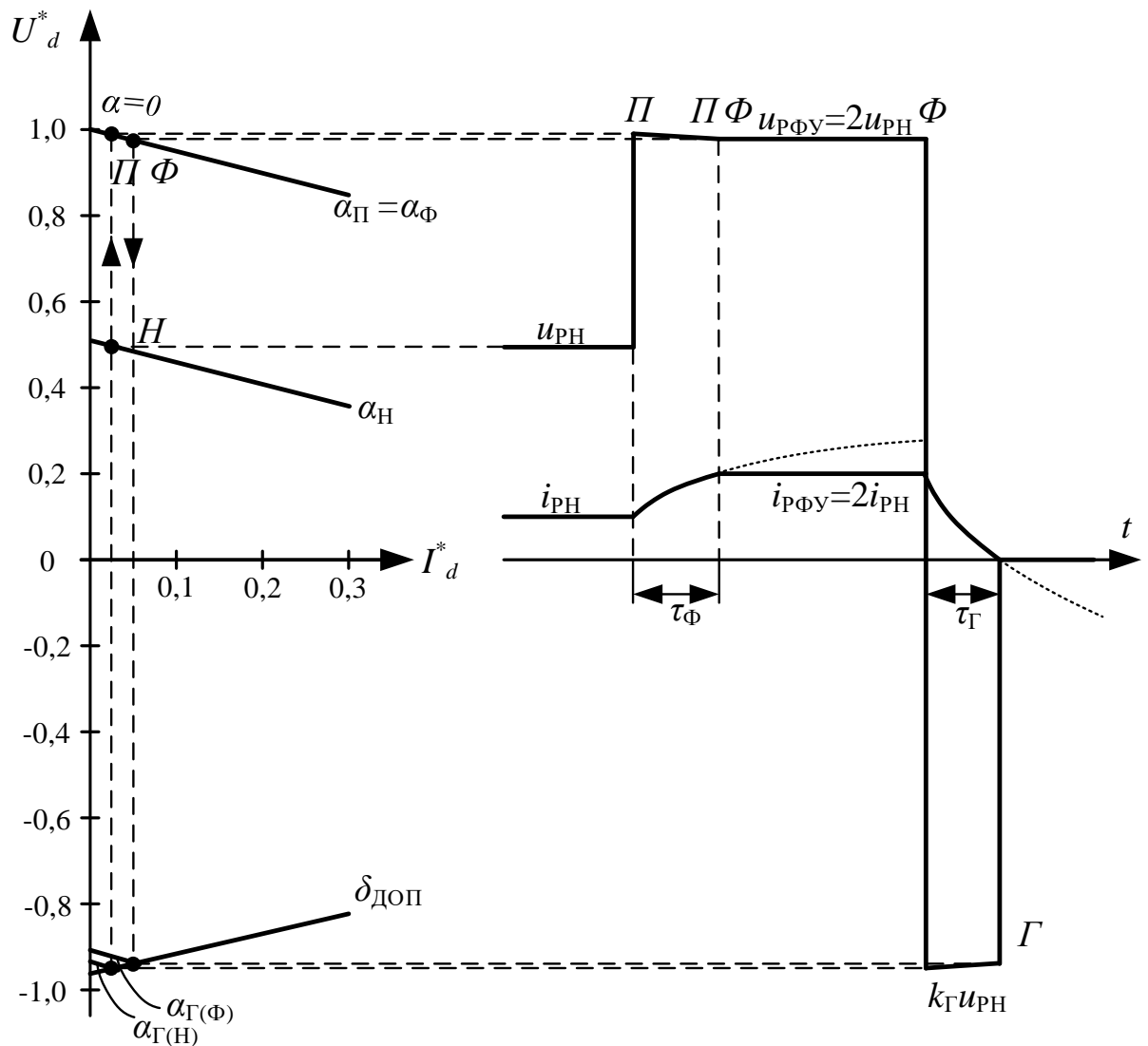


Рисунок 2.3.3 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТРС

Рассмотрим КЗ на выводах ВН блочного трансформатора, значения будут такими же, как и на рабочей системе возбуждения, так как предшествующий режим был номинальным, тогда сопротивление от генератора до точки КЗ по формуле (2.22):

$$X_{\text{КЗ}} = 0,109 \text{ (Ом)};$$

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

55

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась, по формуле (2.34):

$$I_{\text{кз}} = \frac{17,54}{0,292 \cdot \sqrt{3}} = 34,69 \text{ (кА)};$$

напряжение на выводах генератора по формуле (2.35):

$$U'_{\Gamma} = 17,544 - 34,69 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 6,55 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.36):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,183}{\frac{17,54}{15,75} - 1} = 1,604 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.36) строится график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{кз}}$ ) в момент возникновения КЗ, когда форсировка не началась. График показан на рисунках 2.3.4-2.3.5.

Далее необходимо построить график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{кз}}$ ) во время форсировки. Так как напряжение на выводах генератора при КЗ уменьшается, то уменьшится и ЭДС тиристорного преобразователя, которая определяется по следующей формуле:

$$E_2 = \frac{U'_{\Gamma}}{K_T}; \quad (2.47)$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				56
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

где  $K_T$  – коэффициент трансформации цепи от выводов генератора до преобразователя:

$$K_T = \frac{U_{Т.БЛ.НН}}{U_{ТВ.НН}}; \quad (2.48)$$

$$K_T = \frac{15,75}{0,27} = 58,33.$$

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{6\,550}{58,33} = 112,29 \text{ (В)}.$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя уменьшается, то уменьшается и напряжение тиристорного преобразователя при номинальном токе возбуждения, но такое недопустимо, так как последует снижение тока обмотки ротора, поэтому уменьшаем угол  $\alpha$  до 0 град.эл., таким образом начинается режим форсировки.

По формуле (2.40):

$$u_d = 2,34 \cdot 112,29 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,949 = 258,79 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда установили угол  $\alpha$  равный 0 град.эл., по формуле (2.40):

$$i_d = \frac{258,79}{0,082} = 3\,156 \text{ (А)}.$$

		Поснова А.Д.			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	Лист
		Гольдштейн М.Е.				57
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора, по формуле (2.42):

$$E_{Г(1)} = 5,949 \cdot 3\,156 = 18\,775 \text{ (В)}.$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ, по формуле (2.34):

$$I_{кз(1)} = \frac{18\,775}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 37\,122 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно (2.35):

$$U'_{Г(1)} = 27\,434,2 - 54\,243,7 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 7\,008 \text{ (В)}.$$

Подобным образом процесс будет циклическим и итерационным и для резервной системы возбуждения.

Результаты расчета приведены на рисунках ниже.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				58
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

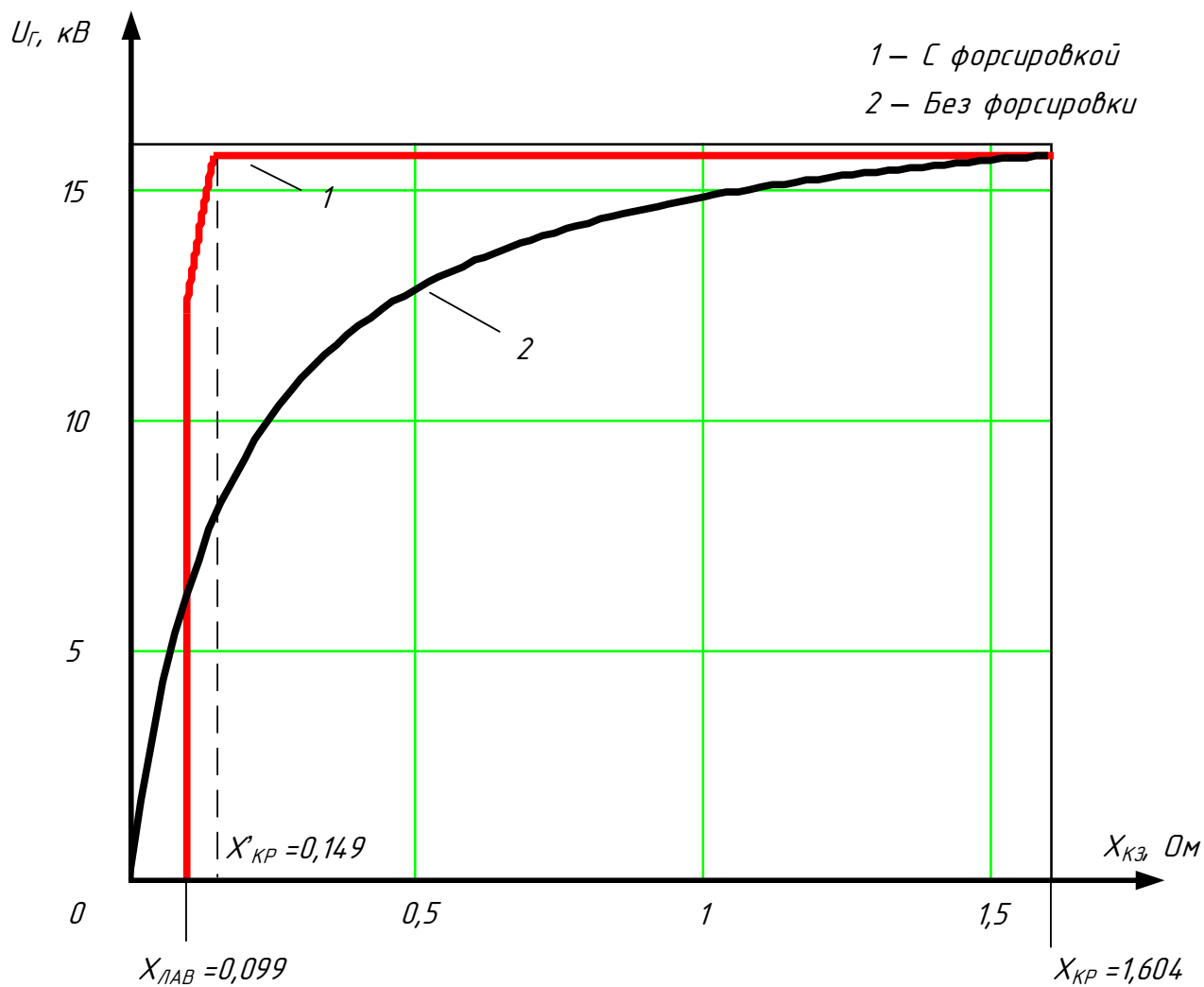


Рисунок 2.3.4 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗВ-220-2 от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{кз}=0..1,604$  (Ом)

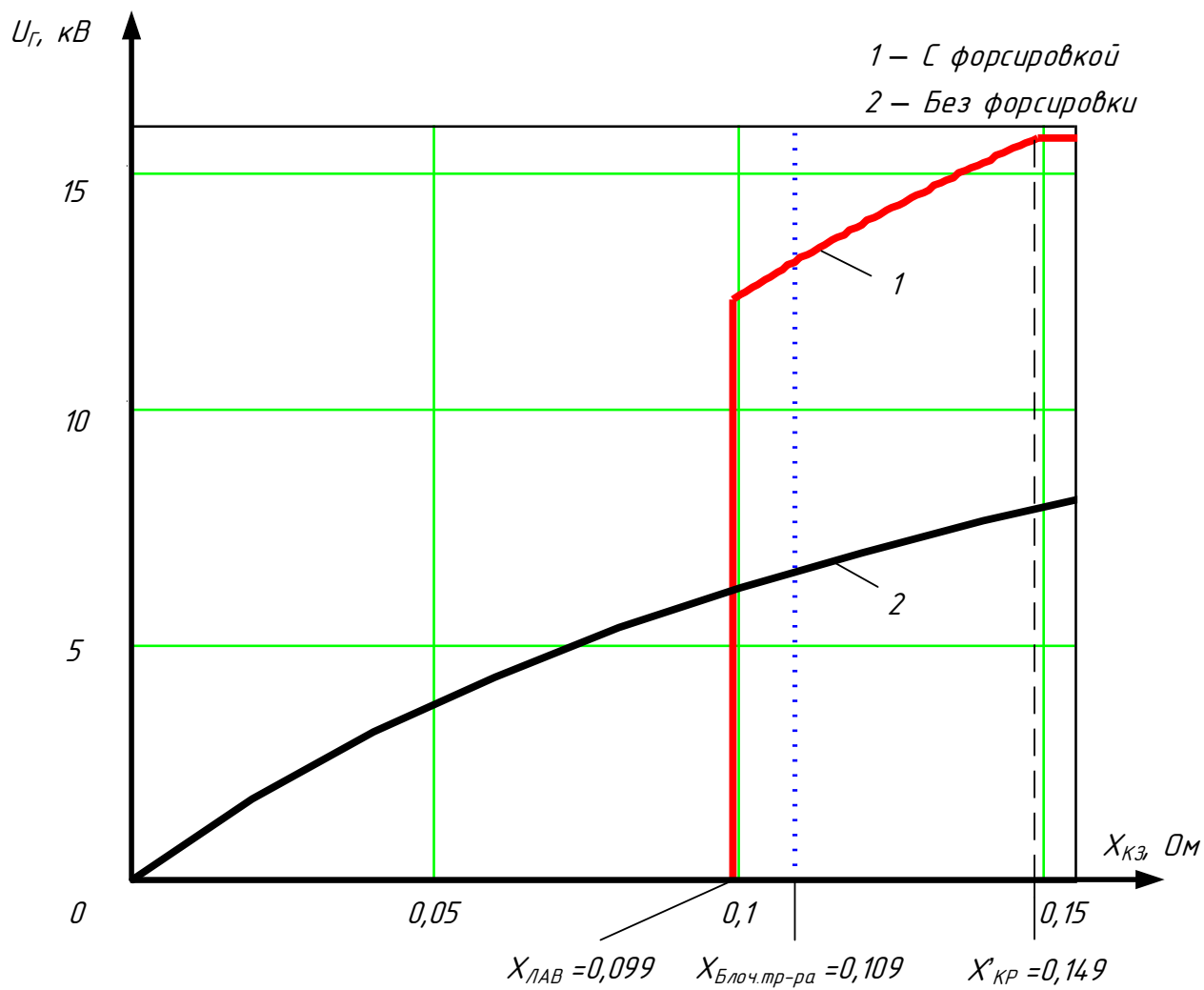


Рисунок 2.3.5 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗВ-200-2 от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{кз}=0..0,16$  (Ом)

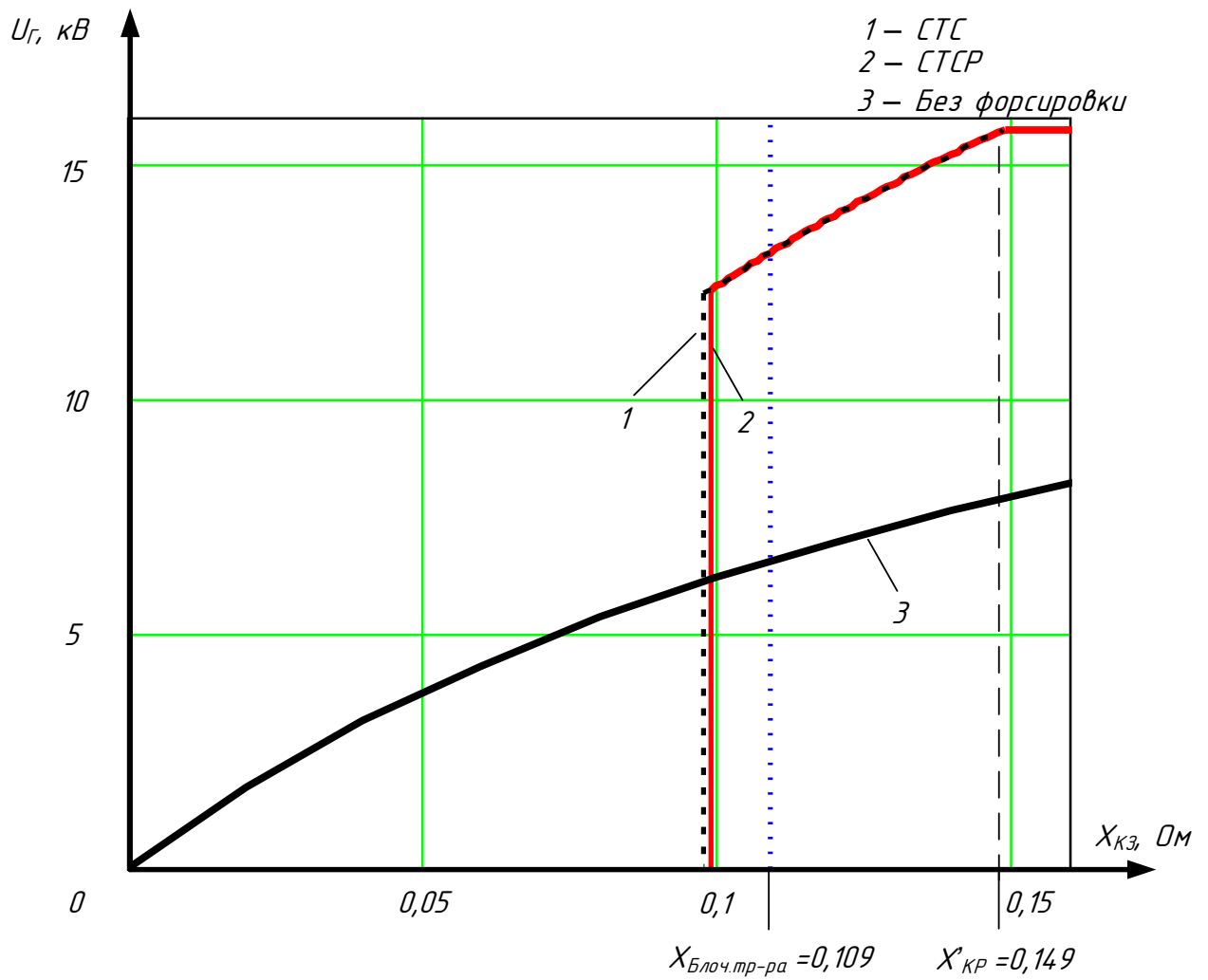


Рисунок 2.3.6 – Сравнение СТС и СТСР при  $X_{\text{кз}}=0..0,16$  (Ом)

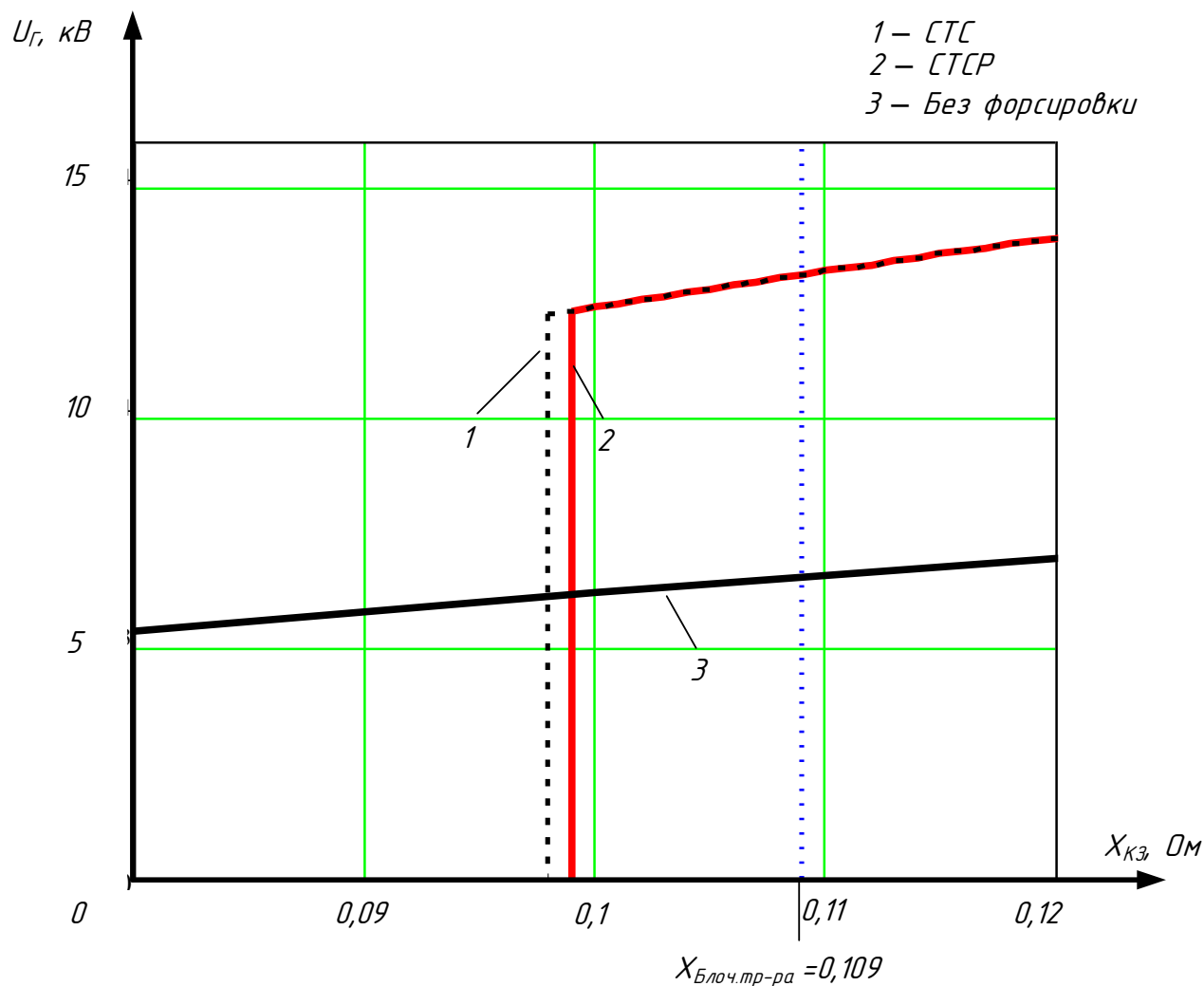


Рисунок 2.3.7 – Сравнение STC и STCR при  $X_{к3}=0,08..0,12$  (Ом)

Сравнивая полученные графики на рис.2.3.4 и 2.3.5 с графиками по STC, можно сделать вывод, что при работе генератора с резервной системой возбуждения лавина напряжения может начаться раньше, так как  $X_{Лав-STC} = 0,098$  Ом, а  $X_{Лав-STCR}=0,099$  Ом. Тем не менее это отличие незначительно, и оно возникает из-за того, что сопротивление  $X_{\gamma}$  в расчете резервной системы больше, чем при расчете рабочей. Это в свою очередь объясняется тем, что резервная система подключена к шинам собственных нужд, а рабочая система непосредственно к выводам генератора. Появление трансформатора собственных нужд (ТСН) и вносит это изменение в расчет.

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

62



В то же время подключение системы возбуждения с шин собственных нужд обеспечит большую надежность в том случае, если есть источник питания электрически не связанный с местом короткого замыкания, либо сопротивление до него достаточно велико. В таком случае данная система по своей сути близка к независимой.

		<i>Поснова А.Д.</i>			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	<i>Лист</i>
		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				<i>63</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РАБОЧЕЙ СИСТЕМЫ САМВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ФОРСИРОВКЕ ТРЕХКРАТНЫМ ТОКОМ

Проведенные в предыдущей главе исследования показали, что при близких коротких замыканиях синхронные генераторы не всегда могут восстановить номинальное значение напряжения на выводах при форсировке двукратным током возбуждения. Из-за этого возникают аварийные ситуации, такие как:

- 1) потеря устойчивости генераторов и их дальнейшее отключение защитами;
- 2) снижение напряжения на шинах собственных нужд электростанций, которое может привести к останову двигателей механизмов собственных нужд, что повлечет за собой останов энергоблока технологическими защитами и потерю довольно большого источника мощности в энергосистеме.

Чтобы избежать эти ситуации, необходимо провести исследование, в ходе которого форсировка генераторов будет осуществлена трехкратным током возбуждения. Это позволит определить, до какой величины восстановится напряжение на выводах синхронных генераторов.

Согласно [1] и [21] еще в СССР не только проводились исследования, но и в дальнейшем применялась трех-, четырех- и пятикратная форсировка синхронных генераторов и гидрогенераторов. В основном, на современных электростанциях используется двукратная форсировка и применение больших токов должно быть обосновано при проектировании нового энергообъекта. Причем завод-изготовитель генераторов и систем возбуждения должен провести испытания и дать гарантию по безопасному и безаварийному применению такой форсировки. Возникает много вопросов по термической стойкости обмотки ротора генератора и тиристоров, установленных в системе возбуждения, а также о насыщении магнитопровода генератора при таких токах [12]. В рамках выпускной квалификационной работы принимается ряд допущений при расчетах термической стойкости обмотки ротора и тиристоров, так как подобные расчеты затруднительны и требуют большого количества данных, которые используются в

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				64
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		

конструкторских бюро, и в свободном доступе их нет. Так как ток существенно возрастет, определим допустимое время такого режима.

Для начала проверим обмотку ротора генератора по термической стойкости и определим допустимое время при протекании трехкратного тока возбуждения. Время определяется из равенства потерь в обмотке возбуждения при двукратной форсировке продолжительностью 20 секунд:

$$t_{\text{доп}} = \frac{(2 \cdot i_{\text{фНОМ}})^2 \cdot t_{2\text{хФОРС}}}{(3 \cdot i_{\text{фНОМ}})^2}; \quad (3.1)$$

где  $i_{\text{фНОМ}}$  - номинальный ток обмотки ротора, равный 2949 А;

$t_{2\text{хФОРС}}$  - допустимое время двукратной форсировки, равное 20 с.

$$t_{\text{доп}} = \frac{(2 \cdot 2949)^2 \cdot 20}{(3 \cdot 2949)^2} = 8,89 \text{ (с)}.$$

Далее определим допустимое время, при котором тиристоры выдержат трехкратный ток возбуждения. В системе самовозбуждения СТС-2В-270-3200-2,5 устанавливаются тиристоры марки Т283-2500-32, параметры которого взяты из каталога завода-изготовителя и приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Основные параметры тиристора Т283-2500-32 согласно [5]

Параметр	Значение
Максимальная температура перехода, °С	125
Пороговое напряжение при $t=125$ °С, В	0,95
Динамическое сопротивление при $t=125$ °С, мОм	0,13
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при $t=85$ °С, А	2 730

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				65
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Максимальная температура перехода из таблицы 9 определяется как:

$$\Theta_{\text{ДОП}} = \Theta_{\text{НОМ}} + \Theta_{\text{ОХЛ}} + \Delta\Theta_{\text{ФОРС}}; \quad (3.2)$$

где  $\Theta_{\text{ДОП}} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\Theta_{\text{ОХЛ}}$  - температура среды охлаждения тиристора, принимается равной  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\Theta_{\text{НОМ}}$  - температура тиристора при номинальном токе ротора (2949 А), которая определяется по формуле:

$$\Theta_{\text{НОМ}} = r_{\text{тепл}}^{(\text{длит})} \cdot (I_{\text{Т.НОМ}} \cdot U_{\text{Т.0}} + K_{\Phi}^2 \cdot I_{\text{Т.НОМ}}^2 \cdot r_{\text{Т}}); \quad (3.3)$$

где  $I_{\text{Т.НОМ}}$  - ток тиристора при номинальном токе ротора, равный  $2949/3=983 \text{ А}$ ;

$U_{\text{Т.0}}$  - пороговое напряжение тиристора из таблицы 9, равное  $0,95 \text{ В}$ ;

$K_{\Phi}$  - коэффициент для прямоугольной формы тока, равный  $\sqrt{3}$ ;

$r_{\text{Т}}$  - динамическое сопротивление тиристора из таблицы 9, равное  $0,13 \text{ мОм}$ ;

$r_{\text{тепл}}^{(\text{длит})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора вместе с охладителем в длительном режиме при протекании номинального тока,  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;

$\Delta\Theta_{\text{ФОРС}}$  - температура тиристора при форсировке, определяется по формуле:

$$\Delta\Theta_{\text{ФОРС}} = r_{\text{тепл}}^{(\text{форс})} \cdot (I_{\text{Т.ФОРС}} \cdot U_{\text{Т.0}} + K_{\Phi}^2 \cdot I_{\text{Т.ФОРС}}^2 \cdot r_{\text{Т}}); \quad (3.4)$$

где  $I_{\text{Т.ФОРС}}$  - ток тиристора в режиме форсировки;

$r_{\text{тепл}}^{(\text{форс})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора вместе с охладителем в кратковременном режиме (форсировка),  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				66
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

Переходное тепловое сопротивление тиристора вместе с охладителем в любом из режимов определяется по аналитическим зависимостям  $r_{\text{тепл}} = f(t)$ , которые приведены в техническом описании тиристора [5]. Допустимое время протекания тока при трехкратной форсировке определяется как раз по этим зависимостям, которые являются экспоненциальной функцией, и в данном случае оно примерно равно 11 секунд.

Так как полученное время больше, чем допустимое по условиям термической стойкости обмотки ротора, то принимается наименьшее, то есть 8,89 секунд. Это означает, что форсировку трехкратным током возбуждения разрешается проводить не более этого времени.

Далее выполним расчет как в пунктах 2.2 и 2.3 для определения напряжения на выводах генератора в зависимости от удаленности короткого замыкания при форсировке трехкратным током.

Сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах такое же как в п.2.2, так как схема не изменилась:

$$X_\gamma = \frac{1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,949 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{199,93} = 0,022 \text{ (о.е.);}$$

Углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{ном}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,022 \cdot (3-1)}{3} \right] = 70,1^\circ;$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_\phi = \arccos [3 \cdot \cos(70,1)] = 12,1^\circ;$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				67
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\Gamma H} = \arccos[-\cos(15) + 0,022] = 160,66^\circ;$$

коэффициент гашения поля из номинального режима по формуле (2.4):

$$K_{\Gamma H} = \frac{\cos(160,66) - 0,5 \cdot 0,022}{\cos(70,1) - 0,5 \cdot 0,022} = -2,9;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\Gamma \Phi} = \arccos[-\cos(15) + 3 \cdot 0,022] = 154^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\Gamma \Phi} = \frac{\cos(154) - 0,5 \cdot 3 \cdot 0,022}{\cos(70,1) - 0,5 \cdot 0,022} = -2,83.$$

Значения напряжений и токов в относительных единицах для построения внешних характеристик:

номинальный режим по формулам (2.7) и (2.8):

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,022 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ном}}^* = \cos(70,1) - 0,5 \cdot 0,022 = 0,33 \text{ (о.е.);}$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				68
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

режим потолочного возбуждения по формулам (2.9) и (2.10):

$$I_{d\Pi}^* = 0,022 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,022 = 0,99 \text{ (о.е.)};$$

режим форсировки установившийся по формулам (2.11) и (2.12):

$$I_{d\Phi}^* = 3 \cdot 0,022 = 0,066 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(12,1) - 0,5 \cdot 0,066 = 0,99 \text{ (о.е.)};$$

режим гашения поля из номинального по формулам (2.13) и (2.14):

$$I_{dГН}^* = 0,022 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{dГН}^* = \cos(160,66) - 0,5 \cdot 0,022 = -0,955 \text{ (о.е.)};$$

режим гашения поля из форсировки по формулам (2.15) и (2.16):

$$I_{dГФ}^* = 3 \cdot 0,022 = 0,066 \text{ (о.е.)};$$

$$U_{dГФ}^* = \cos(154) - 0,5 \cdot 0,066 = -0,932 \text{ (о.е.)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				69
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

Далее производится расчет номинального режима работы генератора:  
номинальный ток в статорной обмотке генератора по формуле (2.17):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{258,8}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 9,49 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18)

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 220^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{258,8^2} \cdot 137^2 + 0,183\right)^2} = 1,07 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 9,49 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{3} = 17,54 \text{ (кВ)}.$$

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				70
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		





ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась, по формуле (2.34):

$$I_{\text{кз}} = \frac{17,54}{0,292 \cdot \sqrt{3}} = 34,69 \text{ (кА)};$$

напряжение на выводах генератора по формуле (2.35):

$$U'_{\Gamma} = 17,544 - 34,69 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 6,55 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.36):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,183}{\frac{17,54}{15,75} - 1} = 1,604 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.36) строится график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{кз}}$ ) в момент возникновения КЗ, когда форсировка не началась. График показан на рисунках 3.2-3.4.

Далее необходимо построить график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{\text{кз}}$ ) во время форсировки. Так как напряжение на выводах генератора при КЗ уменьшается, то уменьшится и ЭДС тиристорного преобразователя, которая определяется по следующей формуле (2.47):

$$E_2 = \frac{U'_{\Gamma}}{K_T};$$

где  $K_T$  – коэффициент трансформации цепи от выводов генератора до преобразователя по формуле (2.48):

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				72
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

$$K_T = \frac{15,75}{0,27} = 58,33.$$

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{6\ 550}{58,33} = 112,29 \text{ (В)}.$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя уменьшается, то уменьшается и напряжение тиристорного преобразователя при номинальном токе возбуждения, но такое недопустимо, так как последует снижение тока обмотки ротора, поэтому уменьшаем угол  $\alpha$  до 0 град.эл., т.е. переходим в режим форсировки, и по формуле (2.40):

$$u_d = 2,34 \cdot 112,29 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 2\ 949 = 258,79 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда установили угол  $\alpha$  равный 0 град.эл., по формуле (2.40):

$$i_d = \frac{258,79}{0,082} = 3\ 156 \text{ (А)}.$$

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора, по формуле (2.42):

$$E_{T(1)} = 5,949 \cdot 3\ 156 = 18\ 775 \text{ (В)}.$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ, по формуле (2.34):

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				73
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		

$$I_{кз(1)} = \frac{18\,775}{\sqrt{3} \cdot 0,292} = 37\,122 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно (2.35):

$$U'_{Г(1)} = 27\,434,2 - 54\,243,7 \cdot 0,183 \cdot \sqrt{3} = 7\,008 \text{ (В)}.$$

Подобным образом процесс будет циклическим и итерационным, как и в расчетах в п.2.2 и 2.3. Результаты расчета приведены на рисунках ниже. Сравним трехкратную и двукратную форсировку.

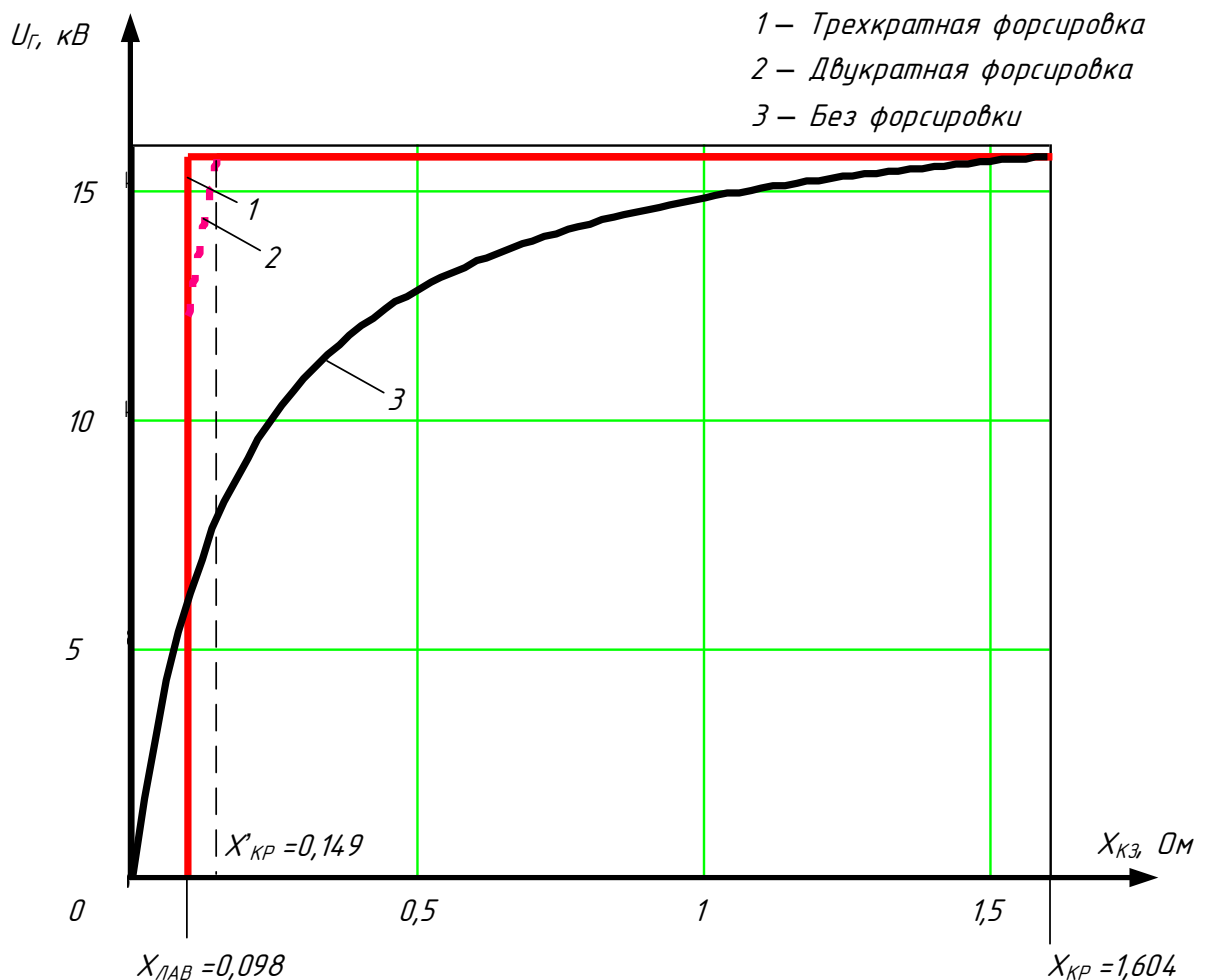


Рисунок 3.2 – Сравнение зависимости напряжения для СТС с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..1,604$  (Ом)

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

74

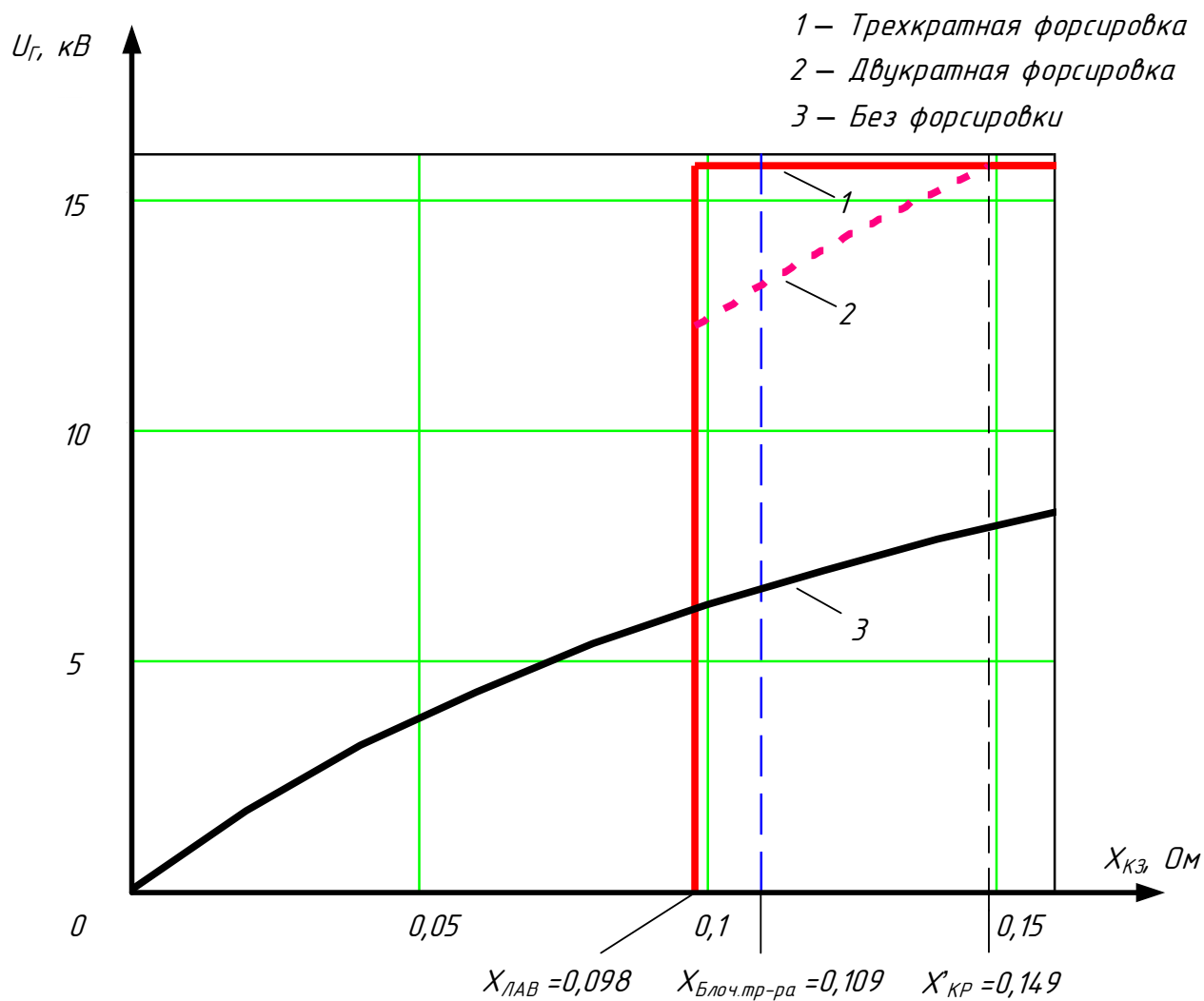


Рисунок 3.3 – Сравнение зависимости напряжения для СТС с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..0,16$  (Ом)

		Поснова А.Д.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00036.ВКР

Лист

75

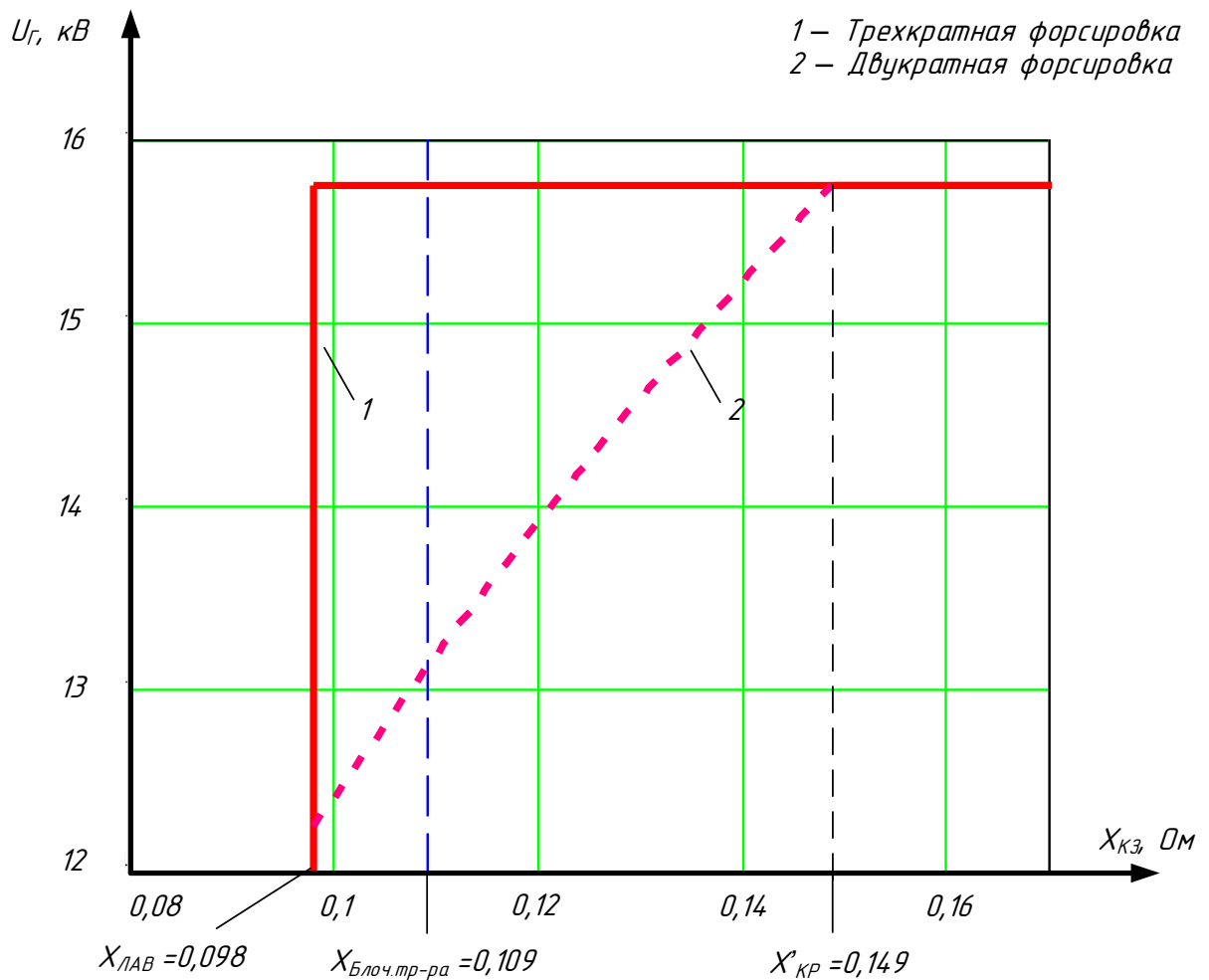


Рисунок 3.4 – Сравнение зависимости напряжения для СТС с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{K3}=0,08..0,17$  (Ом)

На полученных графиках видно, что при трехкратной форсировке напряжение на выводах генератора может восстановиться до номинального даже при очень близких коротких замыканиях, следовательно, цели, которые были поставлены в начале третьей главы, выполнены. Однако, сопротивление  $X_{K3}=0,098$  Ом, при котором возникает лавина напряжения, не изменилось. В данном случае, лавина возникнет, если короткое замыкание будет внутри блочного трансформатора или на шинах между ним и генератором. В этом случае говорить об удержании генератора в сети нет смысла, и его нужно немедленно отключать. Поэтому

уменьшение сопротивления  $X_{\text{ЛДВ}}$  не имеет смысла, и дополнительных мер принимать не нужно.

Однако, когда мощность генератора и его система возбуждения будут другими, может оказаться, что лавина напряжения возникнет при коротких замыканиях, удаленных от шин электростанции на довольно большом расстоянии. В таком случае система возбуждения не сможет поднять напряжение на выводах генератора, и энергосистема может потерять один и даже несколько энергоблоков.

Согласно выполненным расчетам, чтобы избежать таких ситуаций, предполагается устанавливать систему возбуждения с напряжением  $U_{d\text{ном}}$  немного большим, чем номинальное напряжение обмотки ротора  $U_{f\text{ном}}$ , а также выбирать трансформатор возбуждения с меньшим коэффициентом трансформации  $K_{\text{ТВ}}$ , чтобы добиться повышения напряжения на обмотке низкого напряжения  $U_{\text{НН}}$ . В результате можно добиться уменьшения  $X_{\text{ЛДВ}}$  и смещения лавины в левую сторону на графике. Для подобных решений необходимо проводить расчет для каждого генератора и его системы возбуждения отдельно, проверять способность обмотки ротора выдерживать большее напряжение. В том числе необходимо оценить целесообразность данных решений, так как в таком случае затраты на систему возбуждения, трансформатор и вспомогательное оборудование возрастут. Рекомендуется обратить особое внимание на данную проблему при проектировании энергоблоков большой мощности, потеря которых может привести к значительным авариям в энергосистеме и большому экономическому ущербу не только в энергетической, но и других отраслях промышленности.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				77
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Система тиристорная независимого возбуждения (СТН), как и система самовозбуждения (СТС) могут работать и при близких КЗ, поддерживая пониженное напряжение на выводах генератора.

2. Однако, при определенных параметрах СТС и самого генератора, может возникнуть «лавина напряжения», в результате которой СТС не сможет выполнить форсировку и генератор будет отключен защитами.

3. Для заданных генераторов в соответствии с опытом проектирования электростанций были приняты к установке СТС: СТС-2В-270-3200-2,5 – рабочая и СТС-1В-270-3200-2 – резервная система возбуждения.

4. Произведенный анализ показал, что система самовозбуждения при близких коротких замыканиях не может восстановить номинальное напряжение на выводах генератора. Поэтому проведено исследование по увеличению тока возбуждения при форсировке до трехкратного с проверкой обмотки ротора и тиристоров по нагреву.

5. Увеличение тока возбуждения позволило поднять напряжение на выводах генератора до номинального, однако время такой форсировки ограничено до 8,89 секунд. Предполагается применение подобных решений для энергоблоков, у которых при близких коротких замыканиях существенно снижается напряжение. Особое внимание стоит уделить энергоблокам большой мощности, так как их потеря в энергосистеме может вызвать серьезные последствия.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				78
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Абрамов А.И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: Учебное пособие для вузов / А. И. Абрамов, А. В. Иванов-Смоленский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 389 с.
- 2 Белов А.В., Коровин Ю.В., Пахомов Е.И. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В: Учебное пособие. В двух частях Часть 1. Расчет тока трехфазного короткого замыкания. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009.
- 3 Гайсаров Р.В., Коржов А.В., Лежнева Л.А., Лисовская И.Т. Проектирование электрических станций и подстанций: Методические указания к курсовому проекту. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 46 с.
- 4 Гольдштейн М.Е. Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов: Учебное пособие. – 2-е изд. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1999. – 100 с.
- 5 Каталог низкочастотных тиристоров таблеточной конструкции, выпускаемых компанией ОАО «Электровыпрямитель» – [http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/nizkochast\\_tabl.php](http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/nizkochast_tabl.php)
- 6 Каталог отечественных систем возбуждения – <http://praktika2003.ru/data/documents/tro2009-09.pdf>
- 7 Каталожные данные трансформаторов, выпускаемых компанией АО «Уралэлектротяжмаш» – [http://uetm.ru/files/Obshchiy\\_katalog\\_TR\\_2.pdf](http://uetm.ru/files/Obshchiy_katalog_TR_2.pdf)
- 8 Каталожные данные трансформаторов собственных нужд, выпускаемых компанией ОАО «Электрозавод» – [http://www.elektrozavod.ru/production/2\\_1](http://www.elektrozavod.ru/production/2_1)
- 9 Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 10 Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Стереотипное переиздание. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2008. – 704 с.

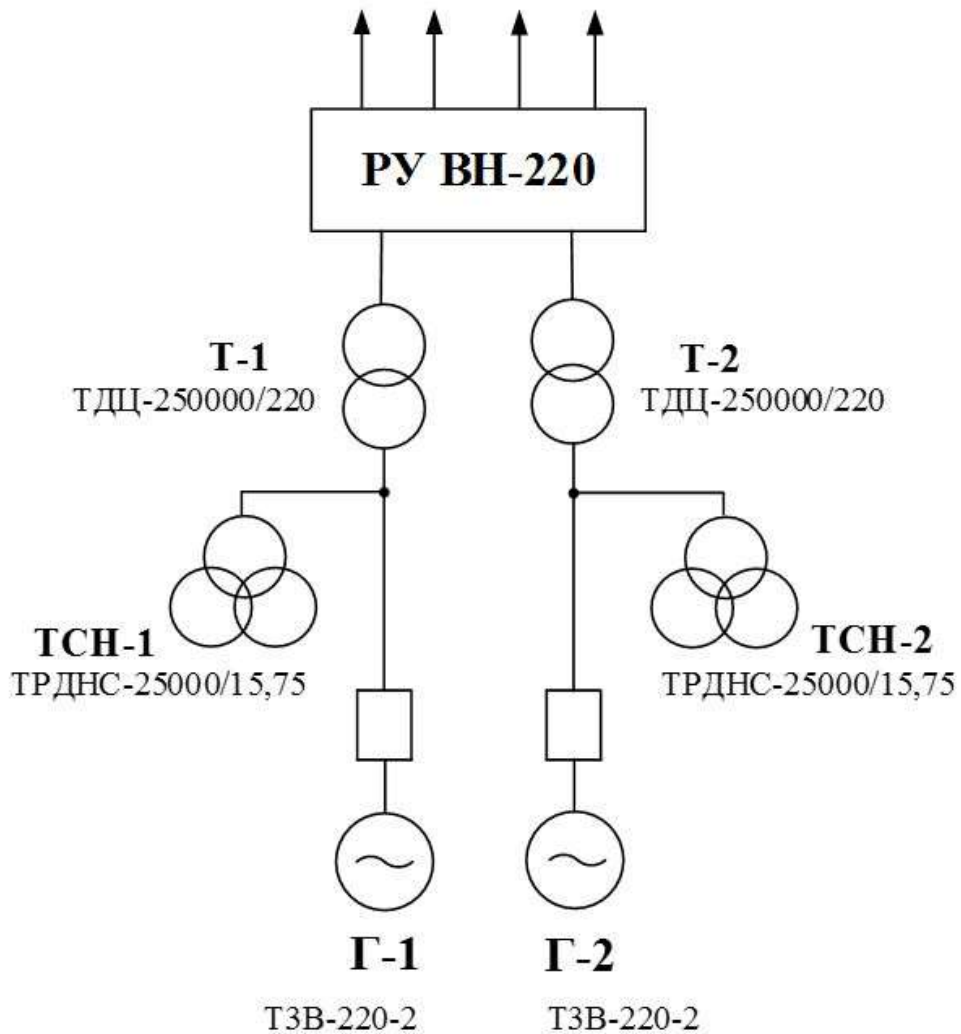
		<i>Поснова А.Д.</i>			<i>13.04.02.2017.00036.ВКР</i>	<i>Лист</i>
		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				<i>79</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- 11 Проектирование электрической части станций и подстанций: Учебное пособие для вузов по специальности "Электрические станции" / Ю. Б. Гук, В. В. Кантан, С. С. Петрова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985 – 312 с.
- 12 Рекус Г.Г. Электрооборудование производств: Справочное пособие / Г. Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2007. – 709 с.
- 13 Системы возбуждения, выпускаемые компанией ПАО «Силовые машины» – [http://www.power-m.ru/products/Default.aspx?section\\_id=142&element\\_id=401](http://www.power-m.ru/products/Default.aspx?section_id=142&element_id=401)
- 14 Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.
- 15 Справочные сведения по синхронным генераторам тепловых и атомных электростанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования по электрической части электрических станций и подстанций/ В.Н. Мазуркевич, В.Н. Сацукевич, М.И. Фурсанов. - Минск, 2010.- 58 с.
- 16 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению. СТО ЮУрГУ 04-2008. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 56 с.
- 17 Техническое описание системы тиристорной самовозбуждения СТС-2В-270-3200-2,5
- 18 Техническое описание системы тиристорной самовозбуждения резервной СТСР-1В-270-3200-2
- 19 Электронный справочник по высоковольтному оборудованию электроустановок для студентов энергетического факультета ЮУрГУ. 2004г.
- 20 Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для студ. сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007 – 448 с.
- 21 Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем./ Под ред. В. А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.

		Поснова А.Д.			13.04.02.2017.00036.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				80
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

**РАБОТА СИНХРОННЫХ  
ГЕНЕРАТОРОВ С ТИРИСТОРНЫМИ  
СИСТЕМАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ  
С ДВУМЯ ПАРОВЫМИ БЛОКАМИ  
ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ  
В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

*Поснова А.Д. П-282*



1) Анализ режимов работы генераторов с учетом удаленности точки КЗ для:

- системы тиристорной независимого возбуждения (СТН);
- системы тиристорной самовозбуждения (СТС);
- системы тиристорной самовозбуждения резервной (СТСР);

2) Исследование режима работы СТС при форсировке трехкратным током.

**Рисунок 1 - Структурная схема ТЭС**

# Анализ режимов работы СТН

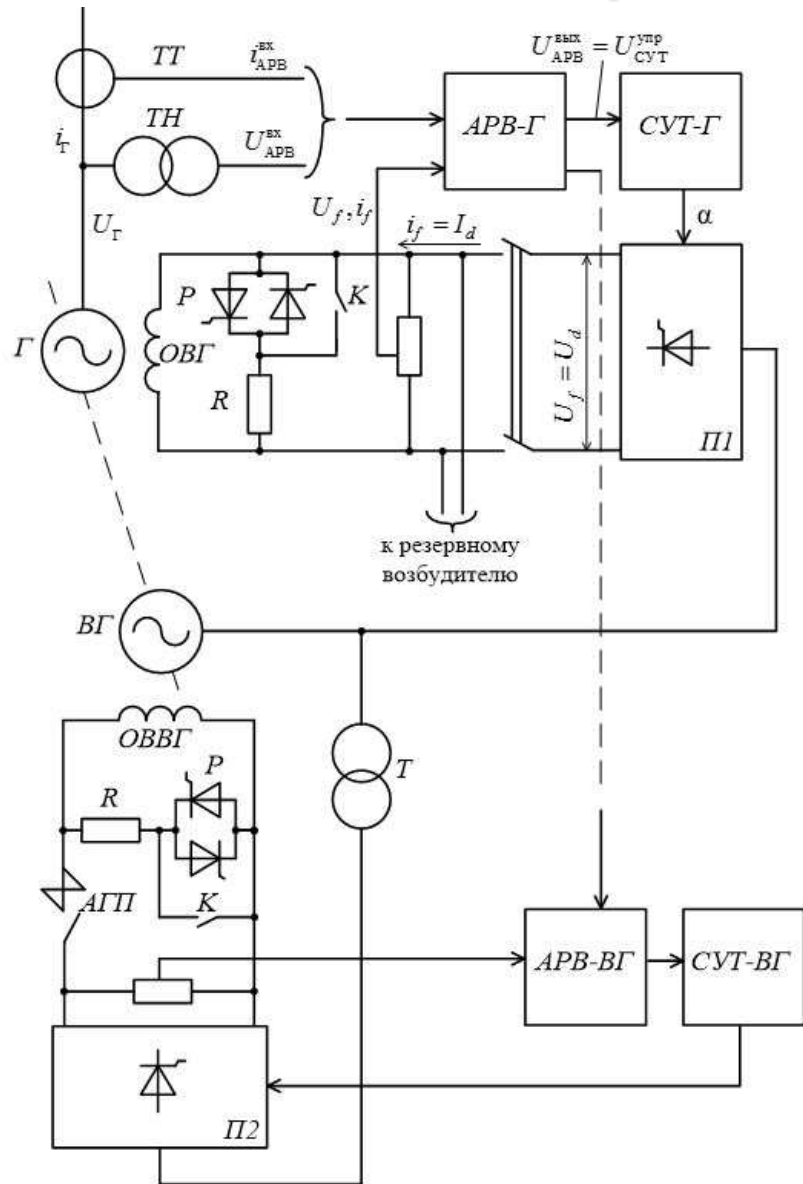


Рисунок 2 - Структурная схема СТН

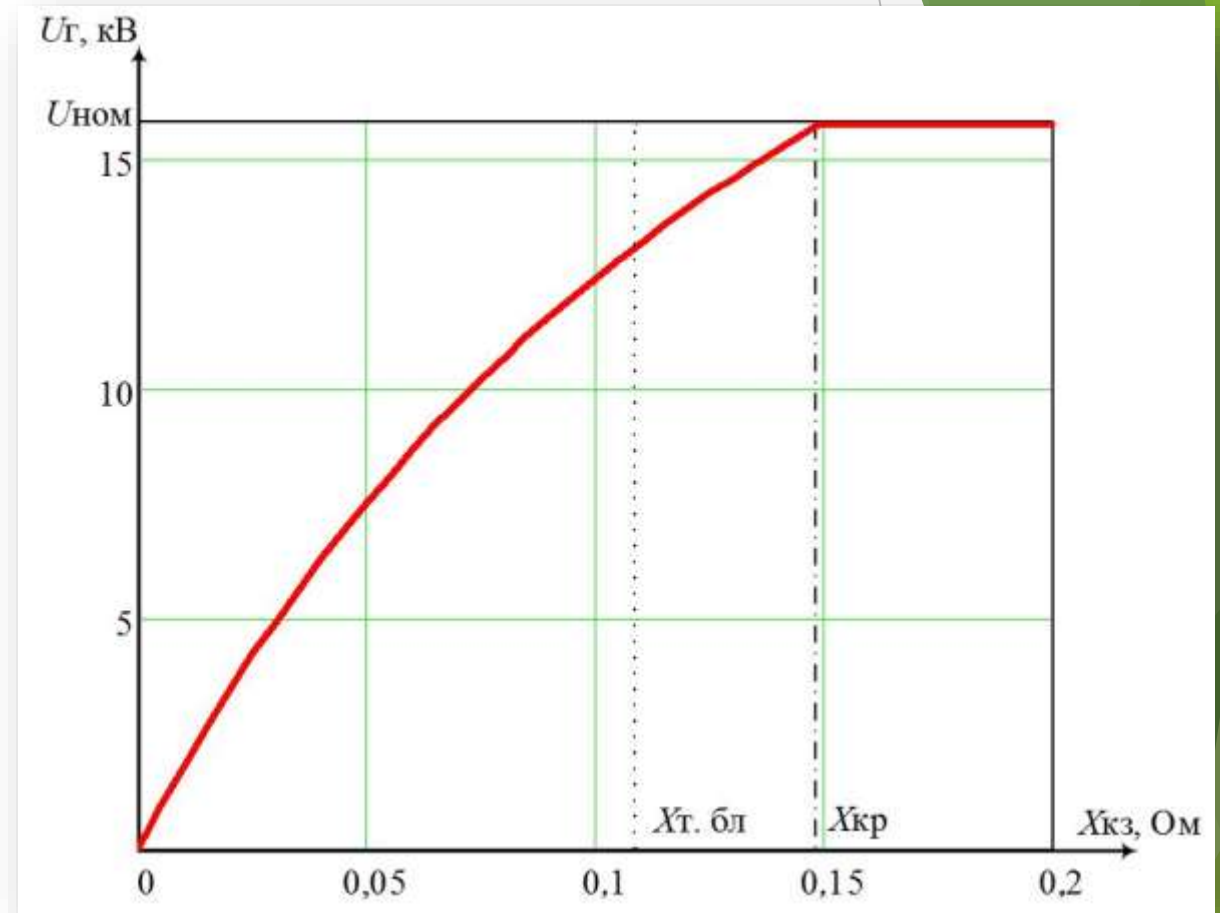
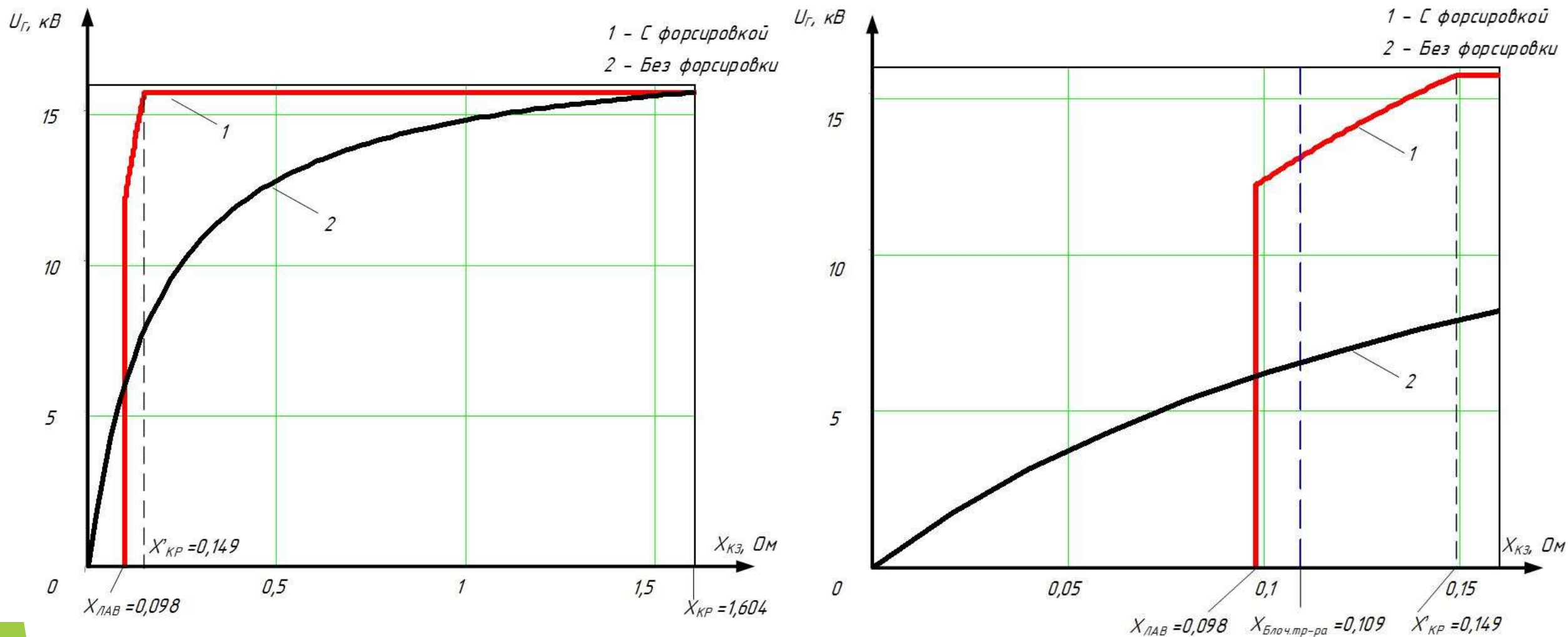


Рисунок 3 - Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности точки КЗ для СТН



# Результаты анализа СТС



**Рисунок 6 - Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности точки КЗ для СТС-2В-270-3200-2,5**



# Сравнение СТН и СТС

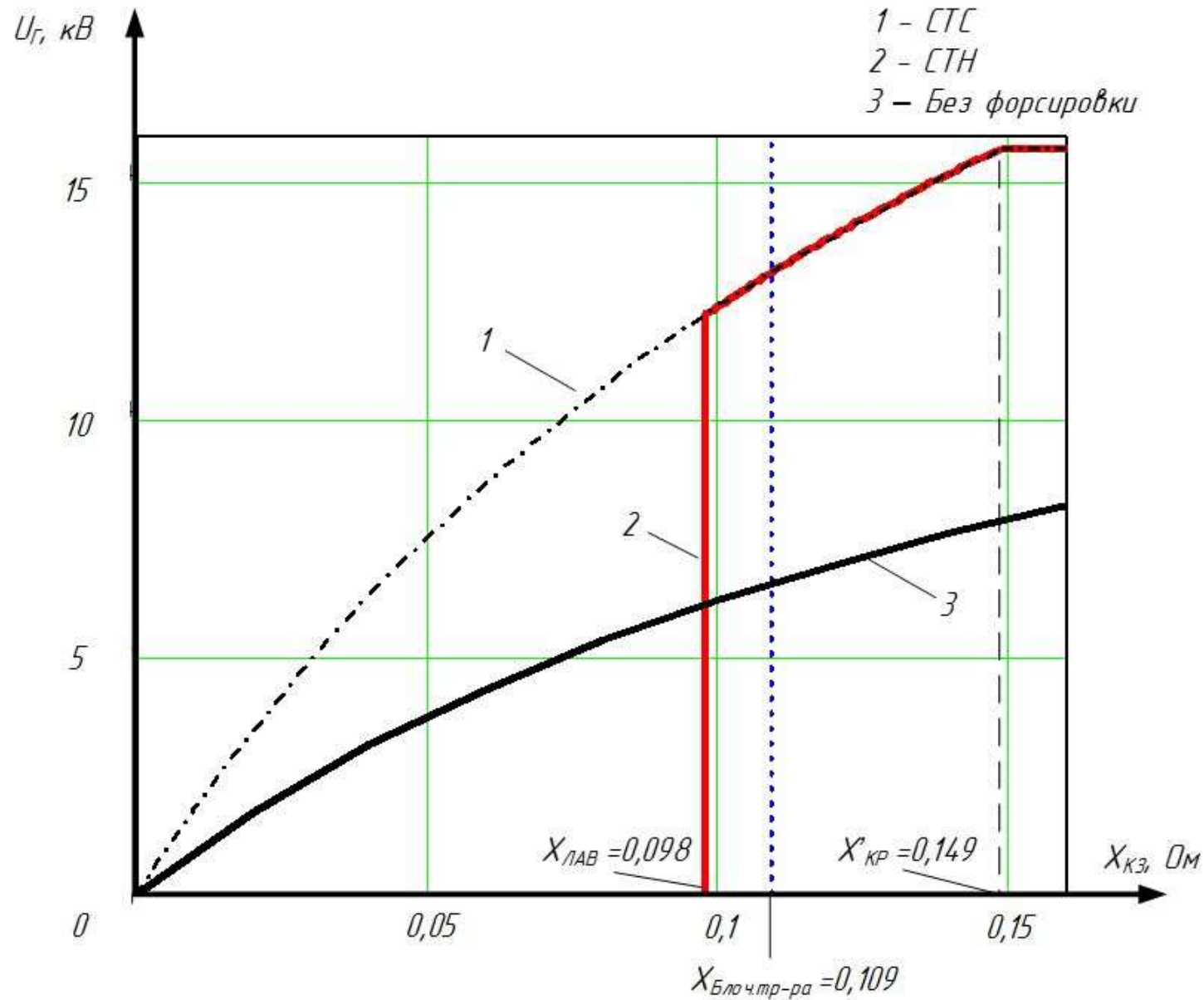
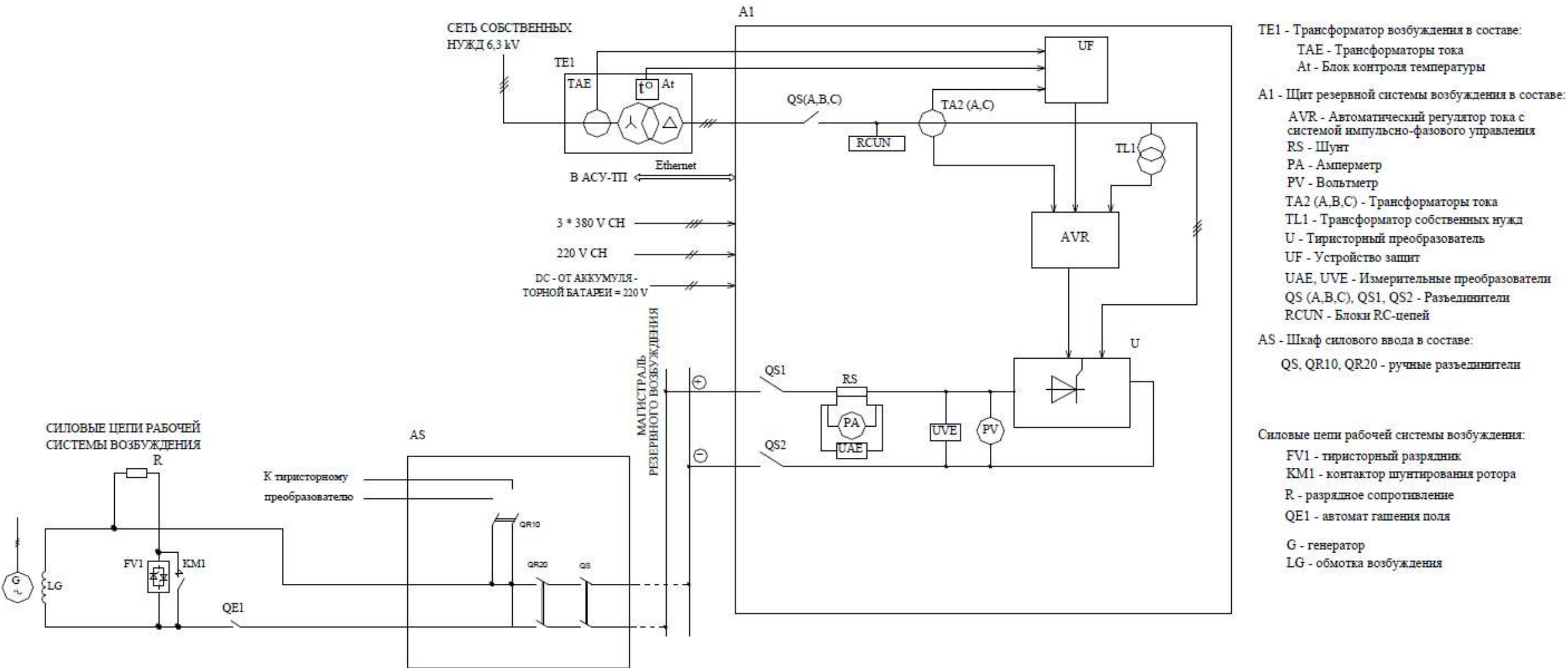


Рисунок 7 - Сравнение зависимостей напряжения на выводах генератора для СТН и СТС



# Анализ режима работы СТСР



TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:  
 TAE - Трансформаторы тока  
 At - Блок контроля температуры

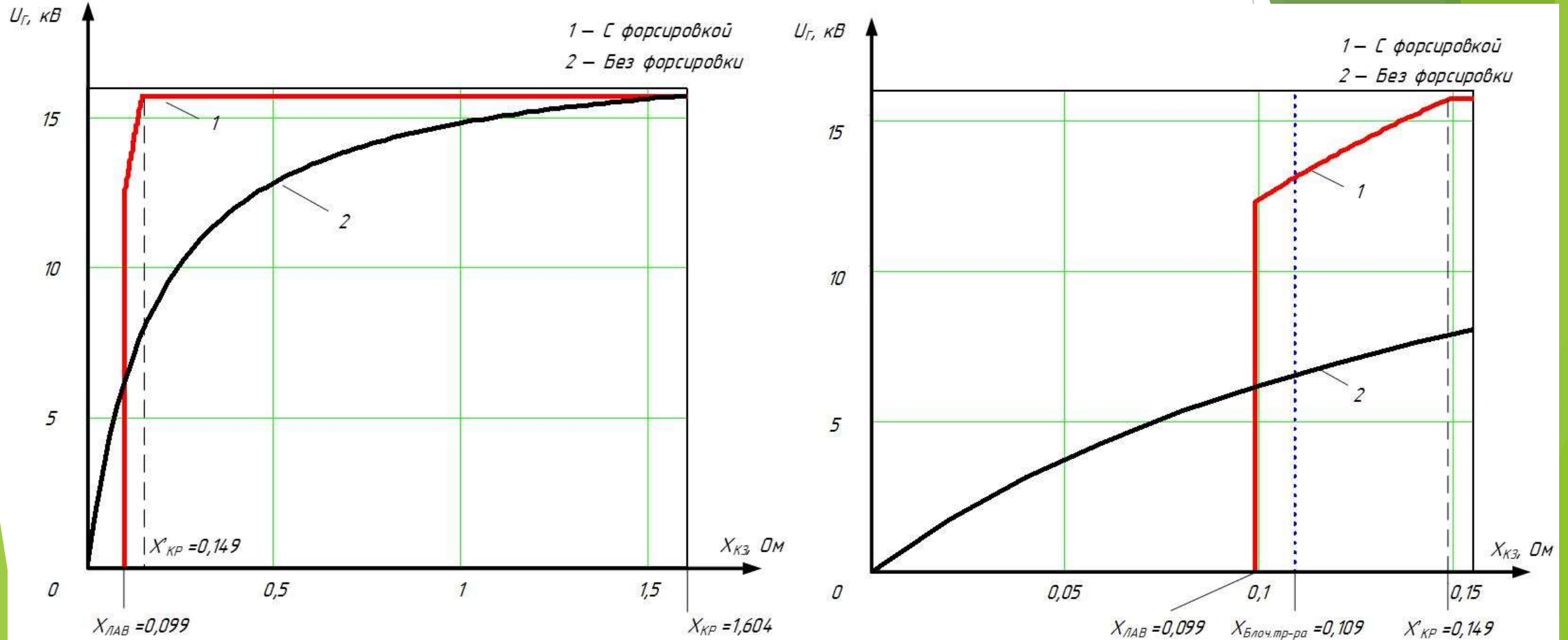
A1 - Щит резервной системы возбуждения в составе:  
 AVR - Автоматический регулятор тока с системой импульсно-фазового управления  
 RS - Шунт  
 PA - Амперметр  
 PV - Вольтметр  
 TA2 (A,B,C) - Трансформаторы тока  
 TL1 - Трансформатор собственных нужд  
 U - Тиристорный преобразователь  
 UF - Устройство защиты  
 UAE, UVE - Измерительные преобразователи  
 QS (A,B,C), QS1, QS2 - Разъединители  
 RCUN - Блоки RC-цепей

AS - Шкаф силового ввода в составе:  
 QS, QR10, QR20 - ручные разъединители

Силовые цепи рабочей системы возбуждения:  
 FV1 - тиристорный разрядник  
 KM1 - контактор шунтирования ротора  
 R - разрядное сопротивление  
 QE1 - автомат гашения поля  
 G - генератор  
 LG - обмотка возбуждения

Рисунок 8 - Функциональная схема СТСР-1В-270-3200-2

# Результаты анализа СТСР



**Рисунок 9 - Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности точки КЗ для СТСР-1В-270-3200-2**

# Сравнение СТС и СТСР

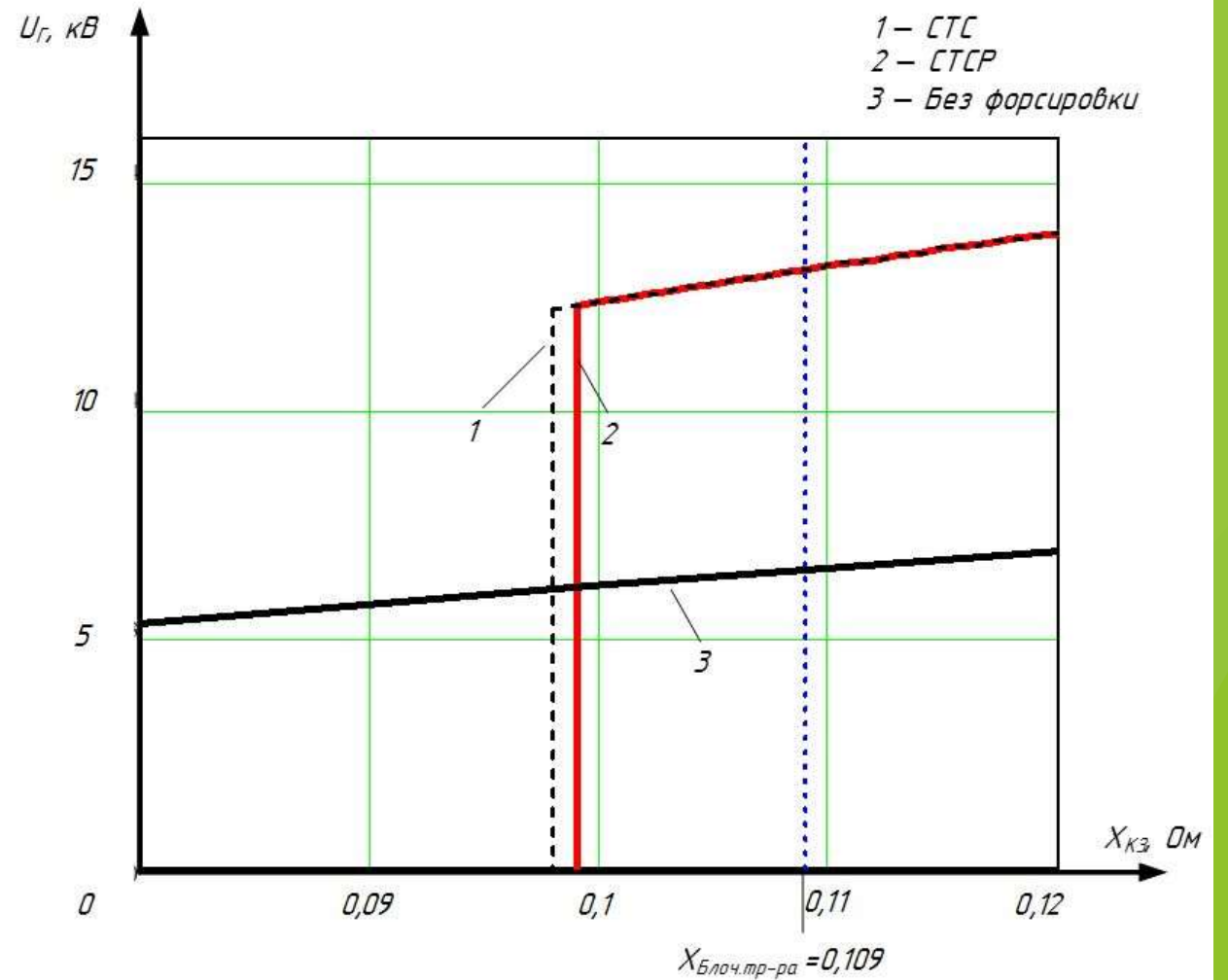
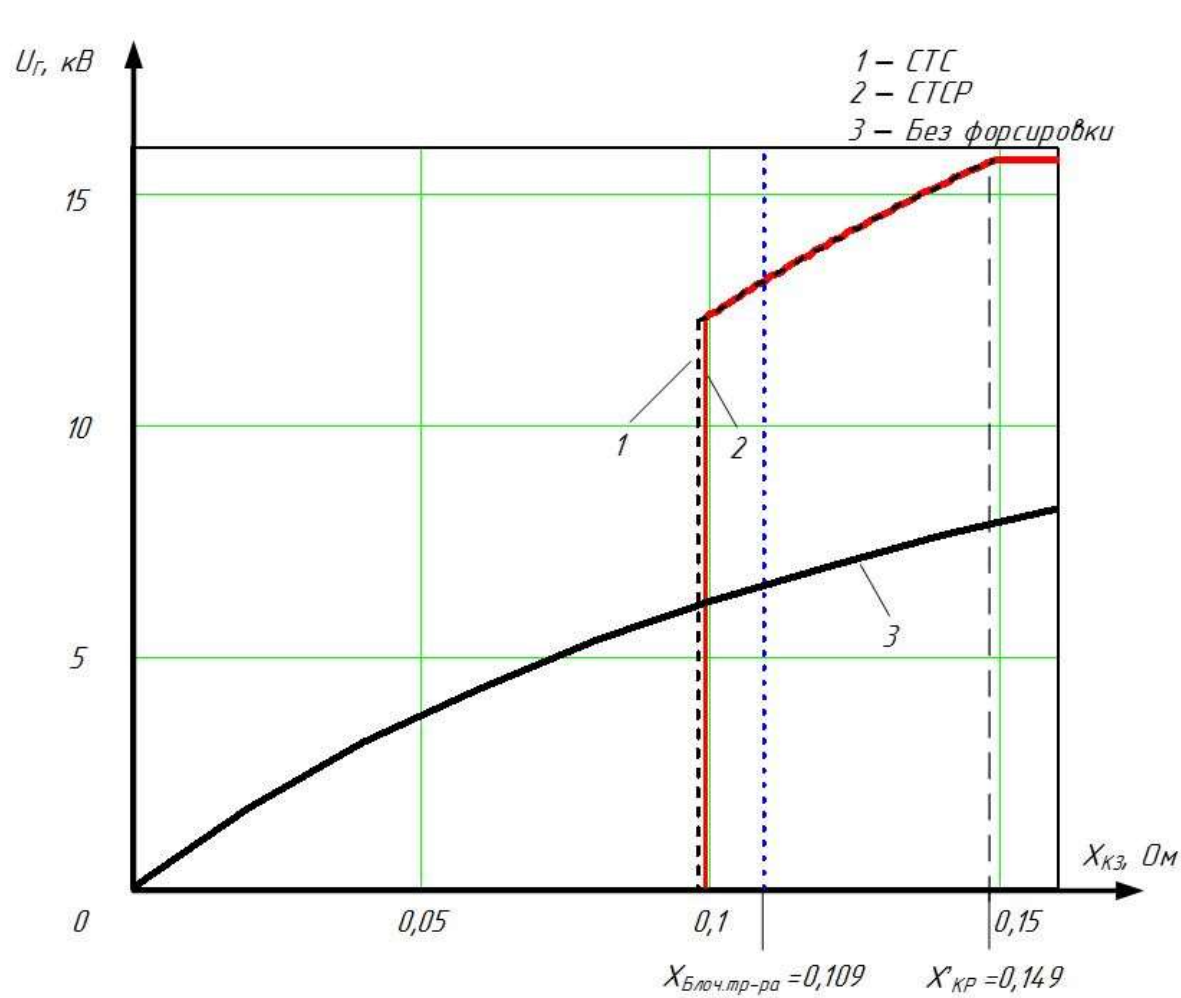
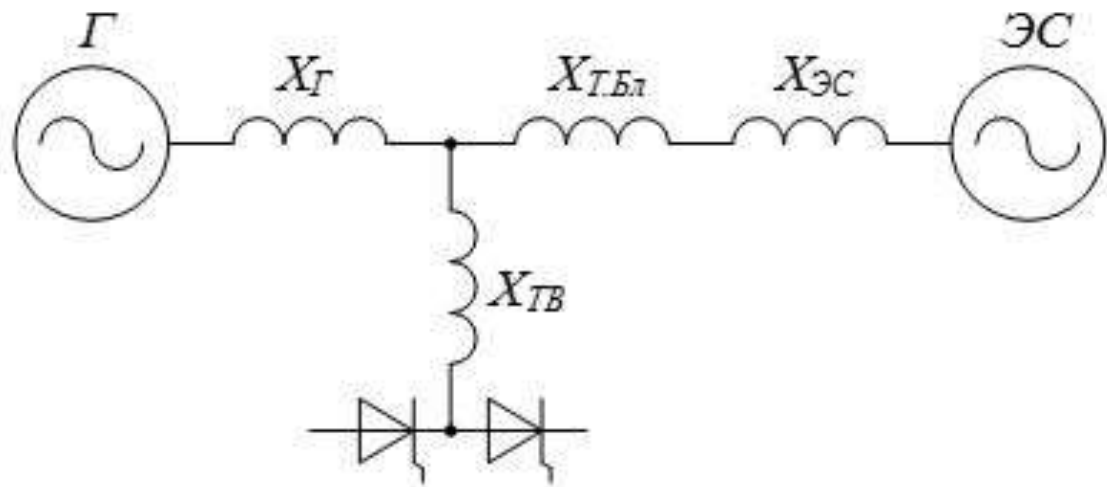
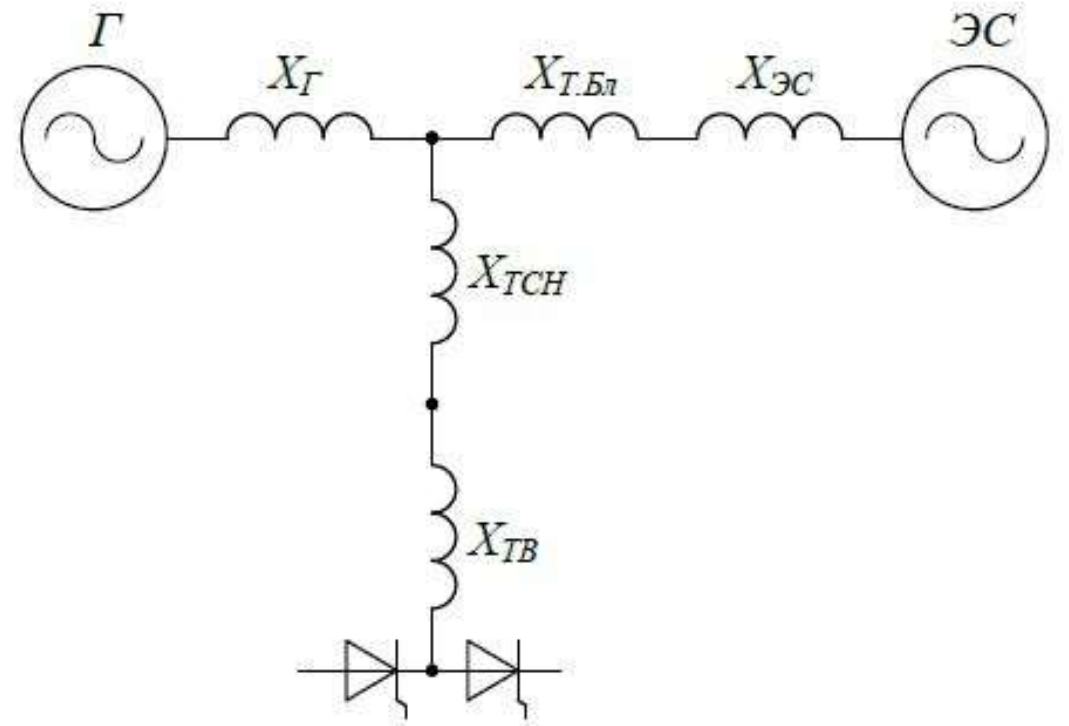


Рисунок 10 - Сравнение зависимостей напряжения на выводах генератора СТС и СТСР

# Сравнение СТС и СТСР



**СТС**



**СТСР**

**Рисунок 11 - Сравнение схем замещения сети, связанной с преобразователем**

# Исследование режимов работы при форсировке трехкратным током

Проведенные исследования показали, что при близких КЗ генераторы не всегда могут восстановить номинальное значение напряжения на выводах при форсировке двукратным током возбуждения. Из-за этого возникают аварийные ситуации, такие как:

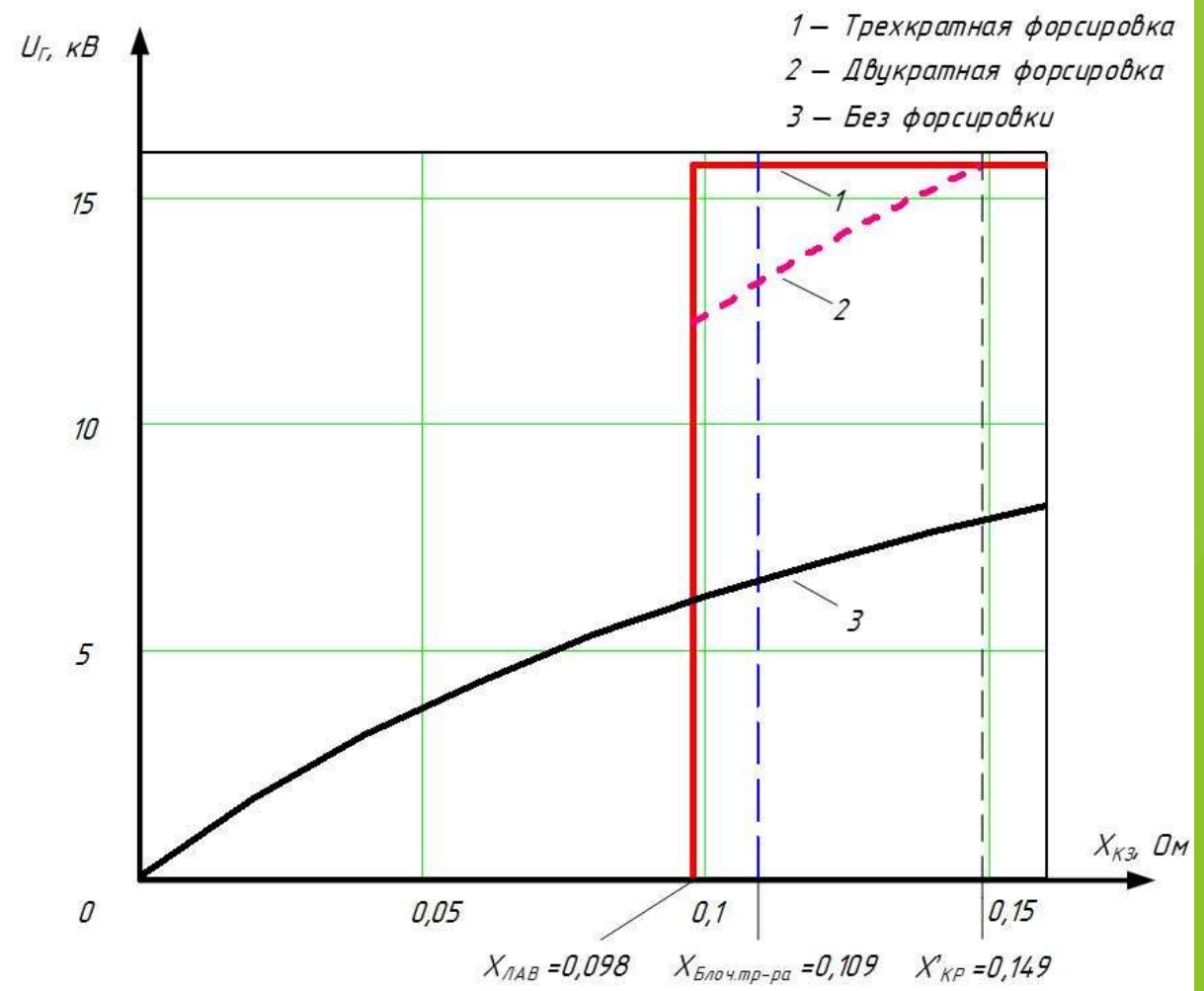
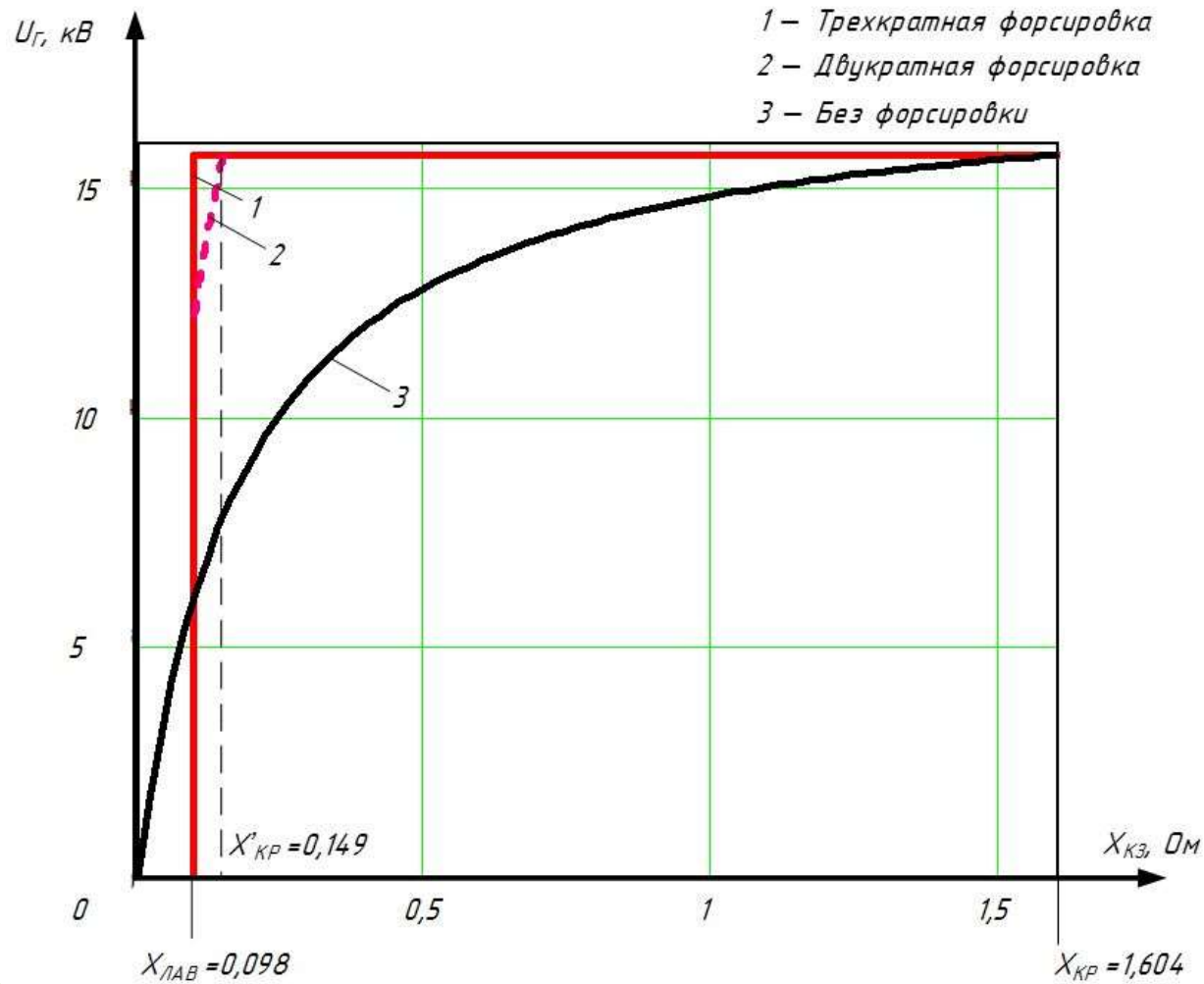
- ▶ потеря устойчивости генераторов и их дальнейшее отключение защитами;
- ▶ снижение напряжения на шинах собственных нужд электростанций, которое может привести к останову двигателей механизмов собственных нужд, что повлечет за собой останов энергоблока технологическими защитами и потерю довольно большого источника мощности в энергосистеме.

Чтобы избежать эти ситуации, необходимо провести исследование, в ходе которого форсировка генераторов будет осуществлена трехкратным током возбуждения.

Предварительно были проверены по термической стойкости обмотка ротора и тиристоры, чтобы определить допустимое время такой форсировки.

Для тиристоров допустимое время оказалось равным **11 секунд**, а для обмотки ротора **8,89 секунд**. Выбрано наименьшее время, в течение которого допускается проводить трехкратную форсировку.

# Результаты исследования форсировки трехкратным током



**Рисунок 12 - Зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности точки КЗ для СТС-2В-270-3200-2,5 при различной форсировке**



# Результаты исследования форсировки трехкратным током

## Итоги:

- ▶ напряжение восстанавливается до  $U_{ном}$ ;
- ▶ сопротивление  $X_{лав}$  не изменилось, но так как лавина возникнет только при КЗ внутри блочного трансформатора, добиваться его изменения нет смысла.

При других параметрах генератора и системы возбуждения может возникнуть режим, когда лавина произойдет при КЗ, удаленных от шин электростанции на довольно большом расстоянии. Результат - потеря одного или несколько энергоблоков.

Решение: установка системы возбуждения с чуть большим  $U_d$  и трансформатора возбуждения с меньшим коэффициентом трансформации.

