

## АННОТАЦИЯ

Поснов А.А. Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя ПГУ при коротких замыканиях в энергосистеме. - Челябинск: ЮУрГУ, П-282; 2017, 130 с., 40 ил., 15 таблиц, библиогр. список – 21 наим., 1 прил.

В выпускной квалификационной работе для электрической станции с двумя ПГУ 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) для каждого генератора 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.

					<i>13.04.02.2017.00035.ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Поснов А.А.</i>			<i>Работа синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения на электрической станции с двумя ПГУ при коротких замыканиях в энергосистеме</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				<i>Д</i>	<i>4</i>	<i>130</i>
<i>Реценз.</i>		<i>Пиминов В.В.</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Гольдштейн М.Е.</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Кирличникова И.М.</i>						

## 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 для генератора ТЗФГ-160-2М.....	10
2.2 Система тиристорная самовозбуждения для генератора ТЗФГ-160-2М.....	23
2.3 Система тиристорная независимого возбуждения для генератора ТЗФП-63-2М.....	45
2.4 Система тиристорная самовозбуждения для генератора ТЗФП-63-2М.....	52
3 СИСТЕМА ТИРИСТОРНАЯ РЕЗЕРВНАЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ.....	71
3.1 Работа генератора ТЗФГ-160-2М с резервной системой возбуждения.....	73
3.2 Работа генератора ТЗФП-63-2М с резервной системой возбуждения.....	88
4 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РАБОЧИХ СИСТЕМ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ФОРСИРОВКЕ ТРЕХКРАТНЫМ ТОКОМ.....	100
4.1 Форсировка трехкратным током на рабочей СТС генератора ТЗФГ-160-2М.....	101
4.2 Форсировка трехкратным током на рабочей СТС генератора ТЗФП-63-2М.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	128
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРЕЗЕНТАЦИЯ .....	130

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				5
Изм.	Лист	№ докум.	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>Поснов А.А.</i>			<i>13.04.02.2017.00035.ВКР</i>	<i>Лист</i>
		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				<i>6</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

# 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тепловая электростанция состоит из двух парогазовых блоков (ПГУ), на каждом из которых установлены два турбогенератора ТЗФГ-160-2М и ТЗФП-63-2М. Генераторы подключены к блочным трансформаторам мощностью 200 МВА и 80 МВА через генераторные выключатели. За генераторным выключателем ТЗФГ-63-2М подключен трансформатор собственных нужд с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА. Необходимо выбрать рабочие 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.

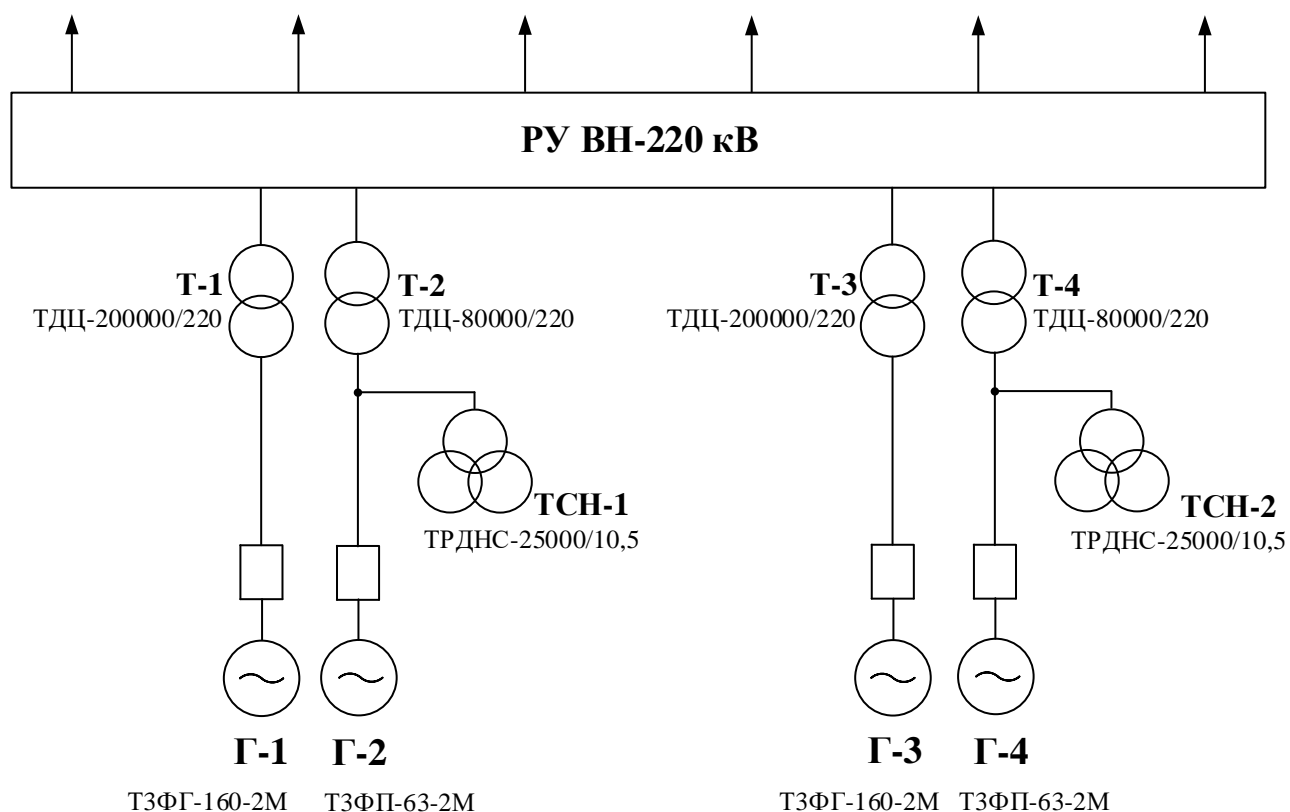


Рисунок 1.1 – Структурная схема ТЭС

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ТЗФГ-160-2М - турбогенератор с непосредственным охлаждением воздухом обмотки ротора, сердечника статора и косвенным охлаждением обмотки статора (по трехконтурной схеме), Г - устанавливается с газовой турбиной, 160 - мощность генератора (МВт), 2 - двухполюсный, М - модернизированный.

ТЗФП-63-2М - турбогенератор с непосредственным охлаждением воздухом обмотки ротора, сердечника статора и косвенным охлаждением обмотки статора (по трехконтурной схеме), П - устанавливается с паровой турбиной, 63 - мощность генератора (МВт), 2 - двухполюсный, М - модернизированный [15].

Серия генераторов ТЗФ имеет следующие преимущества:

- взрывобезопасность и пожаробезопасность;
- повышенная надежность, обусловленная простотой конструкции;
- уменьшенный объем вспомогательного оборудования;
- простота и сокращение сроков профилактического ремонта;
- повышенная маневренность;
- безопасность при обслуживании [3].

Таблица 1 - Технические характеристики турбогенератора ТЗФГ-160-2М [15]

$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$S$ , МВА	$U_{НОМ}$ , кВ	КПД, %	$\cos\varphi$	$X_d''$ , отн.ед.	$n$ , об/мин	Общая масса, т	Масса статора, т
160	99,1	188,2	15,75	98,65	0,85	0,21	3000	248	140

Таблица 2 - Технические характеристики турбогенератора ТЗФП-63-2М [15]

$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$S$ , МВА	$U_{НОМ}$ , кВ	КПД, %	$\cos\varphi$	$X_d''$ , отн.ед.	$n$ , об/мин	Общая масса, т	Масса статора, т
63	47,25	78,75	10,5	98,4	0,8	0,136	3000	123	78

Таблица 3 - Технические характеристики трансформатора ТДЦ-80000/220 [9]

$S_{НОМ}$ , МВА	$U_{ВН}$ , кВ	$U_{НН}$ , кВ	$u_K$ , %	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$I_X$ , %	$R_T$ , Ом	$X_T$ , Ом	$\Delta Q$ , кВАр
80	242	10,5	11	320	105	0,6	2,9	80,5	480

Таблица 4 - Технические характеристики трансформатора ТДЦ-200000/220

$S_{НОМ}$ , МВА	$U_{ВН}$ , кВ	$U_{НН}$ , кВ	$u_K$ , %	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$I_X$ , %	$R_T$ , Ом	$X_T$ , Ом	$\Delta Q$ , кВАр
200	242	15,75	11	580	200	0,45	0,77	32,2	900

ТДЦ - трансформаторы трехфазные с принудительной циркуляцией воздуха и масла с ненаправленным потоком масла [14].

Таблица 5 - Технические характеристики трансформатора ТРДНС-25000/10,5

$S_{НОМ}$ , МВА	$U_{ВН}$ , кВ	$U_{НН}$ , кВ	$u_K$ , %	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$I_X$ , %
25	10,5	6,3	9,5	115	25	0,5

ТРДНС - трансформатор трехфазный с расщепленной обмоткой, с масляным охлаждением с дутьем и естественной циркуляцией масла, с регулированием под напряжением [8].

## 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 каждого из генераторов производится расчет систем возбуждения и анализ их работы при КЗ в энергосистеме. Для выполнения расчета используется учебное пособие [4].

### 2.1 Система тиристорная независимого возбуждения для генератора ТЗФГ-160-2М

Исходные данные:

номинальный ток возбуждения генератора  $I_d = 1\ 745\ \text{А}$ ;

номинальное напряжение возбуждения генератора  $U_d = 260\ \text{В}$ ;

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

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

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		





Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим:

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

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

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:

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

режим гашения поля из форсировки:

$$\alpha_{Гф} = \arccos[-\cos(\delta_{доп}) + 2 \cdot X_{\gamma}]; \quad (2.5)$$

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

коэффициент гашения поля из форсировки:

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

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

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

номинальный режим:

$$I_{dНОМ}^* = X_{\gamma}; \quad (2.7)$$

$$I_{dНОМ}^* = 0,08 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

режим потолочного возбуждения:

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

$$I_{d\Pi}^* = 0,08 \text{ (о.е.)};$$

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

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

режим форсировки установившийся:

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

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

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

режим гашения поля из номинального:

$$I_{d\Gamma H}^* = X_{\gamma}; \quad (2.13)$$

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

$$U_{d\Gamma H}^* = \cos(\alpha_{\Gamma H}) - 0,5 \cdot I_{d\Gamma H}^*; \quad (2.14)$$

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

режим гашения поля из форсировки:

$$I_{d\Gamma\phi}^* = 2 \cdot X_{\gamma}; \quad (2.15)$$

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

$$U_{d\Gamma\phi}^* = \cos(\alpha_{\Gamma\phi}) - 0,5 \cdot I_{d\Gamma\phi}^*; \quad (2.16)$$

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Изобразим внешние характеристики СТН генератора ТЗФГ-160-2М на рисунке 2.2.

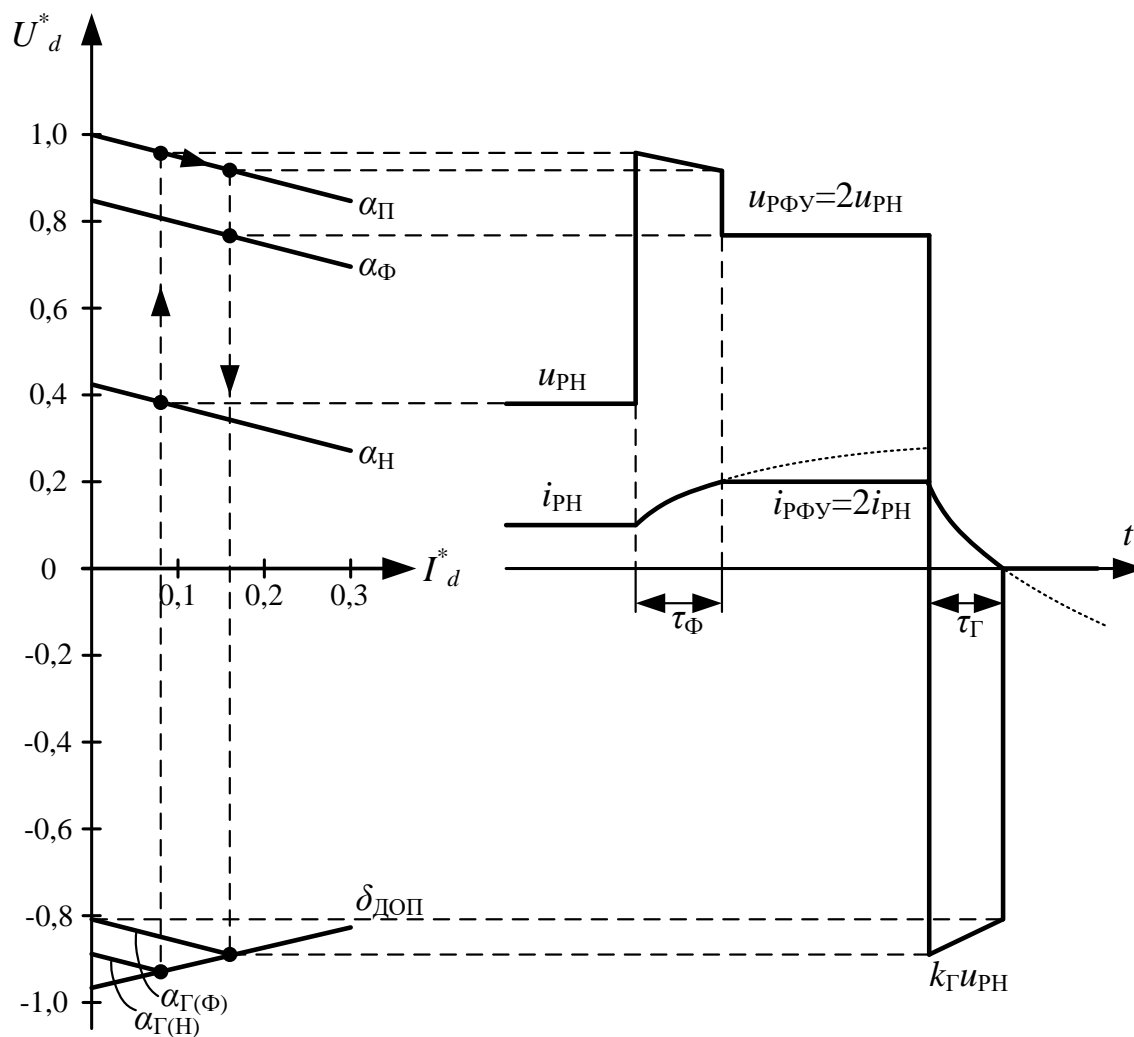


Рисунок 2.2 - Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТН генератора ТЗФГ-160-2М

Далее производится расчет номинального режима работы генератора:  
номинальный ток в статорной обмотке генератора:

$$I_{НОМ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}; \quad (2.17)$$

где  $U_{НОМ}$  - номинальное напряжение генератора на его выводах, кВ;

$S_{НОМ}$  - номинальная полная мощность генератора, МВА;

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{188,2}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 6,9 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора согласно [2]:

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

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:

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

где  $X_d$  - сверхпереходное сопротивление генератора, о.е.;

$$X_{\Gamma} = \frac{15,75^2}{188,2} \cdot 0,21 = 0,277 \text{ (Ом)};$$

тогда полное сопротивление генератора будет равно:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 160^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 99,1^2 + 0,277\right)^2} = 1,48 \text{ (Ом)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

номинальная ЭДС генератора:

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

$$E_{\text{НОМ}} = 7,33 \cdot 1,41 \cdot \sqrt{3} = 17,72 \text{ (кВ)}.$$

Далее производится расчет режима короткого замыкания и определение критического сопротивления:

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

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

где  $u_{k\%}$  - напряжение короткого замыкания, %;

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

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

$$X_{\text{Т.бл}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{200} = 0,136 \text{ (Ом)}.$$

Схема замещения цепи генератор-энергосистема показана на рисунке 2.3.

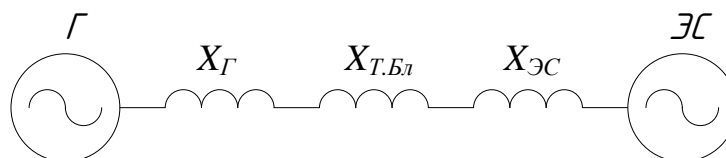


Рисунок 2.3 - Схема замещения цепи генератор-энергосистема

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

$$X_{\text{КЗ}} = 0,136 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{2 \cdot E_{\text{НОМ}}}{Z_{\text{КЗ}} \cdot \sqrt{3}}; \quad (2.23)$$

где

$$Z_{\text{КЗ}} = X_{\text{КЗ}} + X_{\text{Г}}; \quad (2.24)$$

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,136 + 0,277 = 0,413 \text{ (Ом)};$$

тогда ток КЗ будет равен:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{2 \cdot 17,716}{0,413 \cdot \sqrt{3}} = 49,504 \text{ (кА)};$$

базисный ток:

$$I_{\text{б}} = \frac{I_d}{I_{d\text{НОМ}}}; \quad (2.25)$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$I_{\sigma} = \frac{1\,745}{0,08} = 21,81 \text{ (кА)};$$

базисное напряжение:

$$U_{\sigma} = \frac{U_d}{* U_{dНОМ}}; \quad (2.26)$$

$$U_{\sigma} = \frac{260}{0,384} = 677,08 \text{ (В)};$$

ток ротора в режиме форсировки:

$$I_p = 2 \cdot I_d; \quad (2.27)$$

$$I_p = 2 \cdot 1\,745 = 3\,490 \text{ (А)};$$

ток ротора в режиме форсировки в относительных единицах:

$$I'_p = \frac{I_p}{I_{\sigma}}; \quad (2.28)$$

$$I'_p = \frac{3,49}{21,81} = 0,16 \text{ (о.е.)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки:

$$U_p = I_p \cdot \frac{U_d}{I_d}; \quad (2.29)$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$U_p = 3\,490 \cdot \frac{260}{1745} = 520 \text{ (В)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки в относительных единицах:

$$U'_p = \frac{U_p}{U_{\delta}}; \quad (2.30)$$

$$U'_p = \frac{520}{677,08} = 0,768 \text{ (о.е.)};$$

угол в режиме форсировки:

$$\alpha_{\phi} = \arccos[U'_p + 0,5 \cdot I'_p]; \quad (2.31)$$

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

тогда напряжение на выводах генератора в режиме форсировки:

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot E_{\text{НОМ}} \cdot \frac{X_{\text{кз}}}{X_{\text{кз}} + X_{\Gamma}}; \quad (2.32)$$

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot 17,716 \cdot \frac{0,136}{0,136 + 0,277} = 11,7 \text{ (кВ)}.$$

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$X_{кр} = \frac{X_{Г}}{\frac{2 \cdot E_{НОМ}}{U_{НОМ}} - 1}; \quad (2.33)$$

$$X_{кр} = \frac{0,277}{\frac{2 \cdot 17,716}{15,75} - 1} = 0,221 \text{ (Ом)}.$$

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

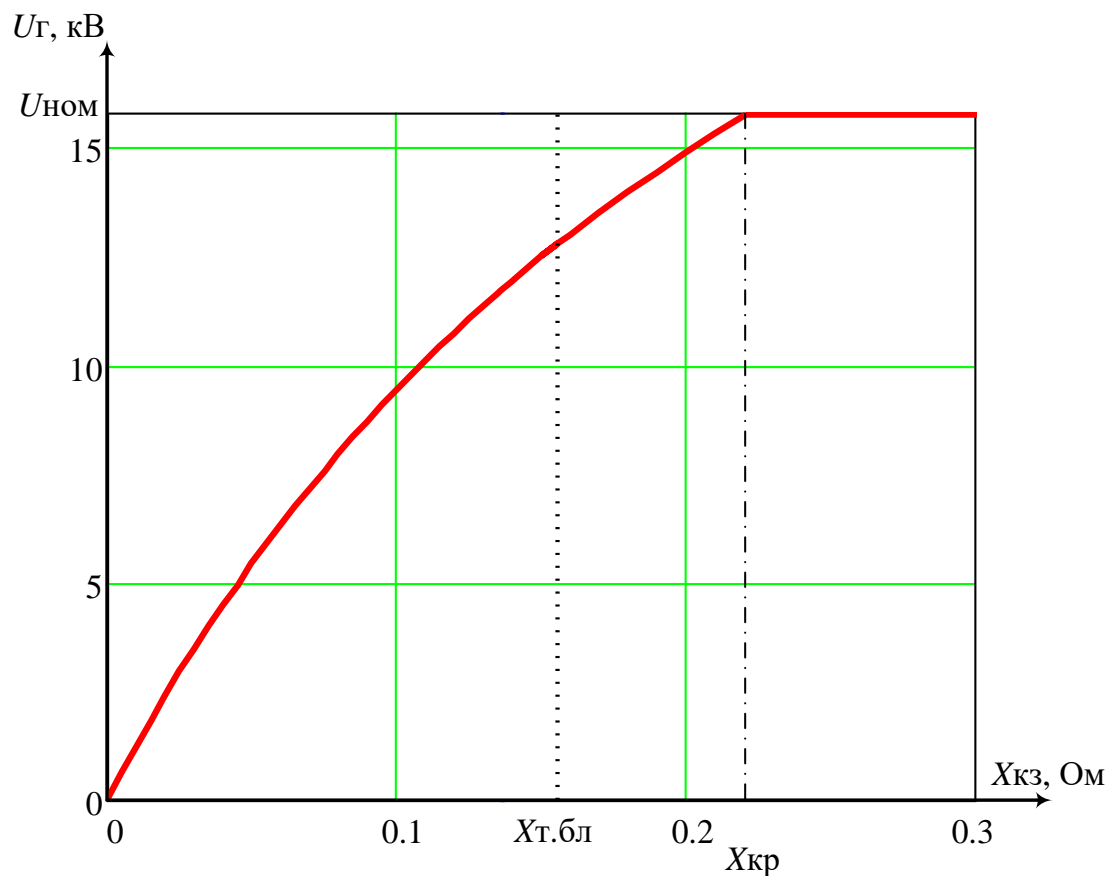


Рисунок 2.4 - Зависимость напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ для СТН



Таблица 6 – Основные технические характеристики СТСН-2П-270-1900-2,5

Длительно допустимое напряжение системы возбуждения, В	270
Длительно допустимый ток системы возбуждения, А	1 900
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 воздушное
Количество преобразовательно-регулирующих каналов	2
Число параллельных тиристорov в плече	1
Марка тиристора	T283-2500-30-71
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 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 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 отключении тиристора [17].

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения СТСН-2П-270-1900-2,5 представлена на рисунке 2.6.

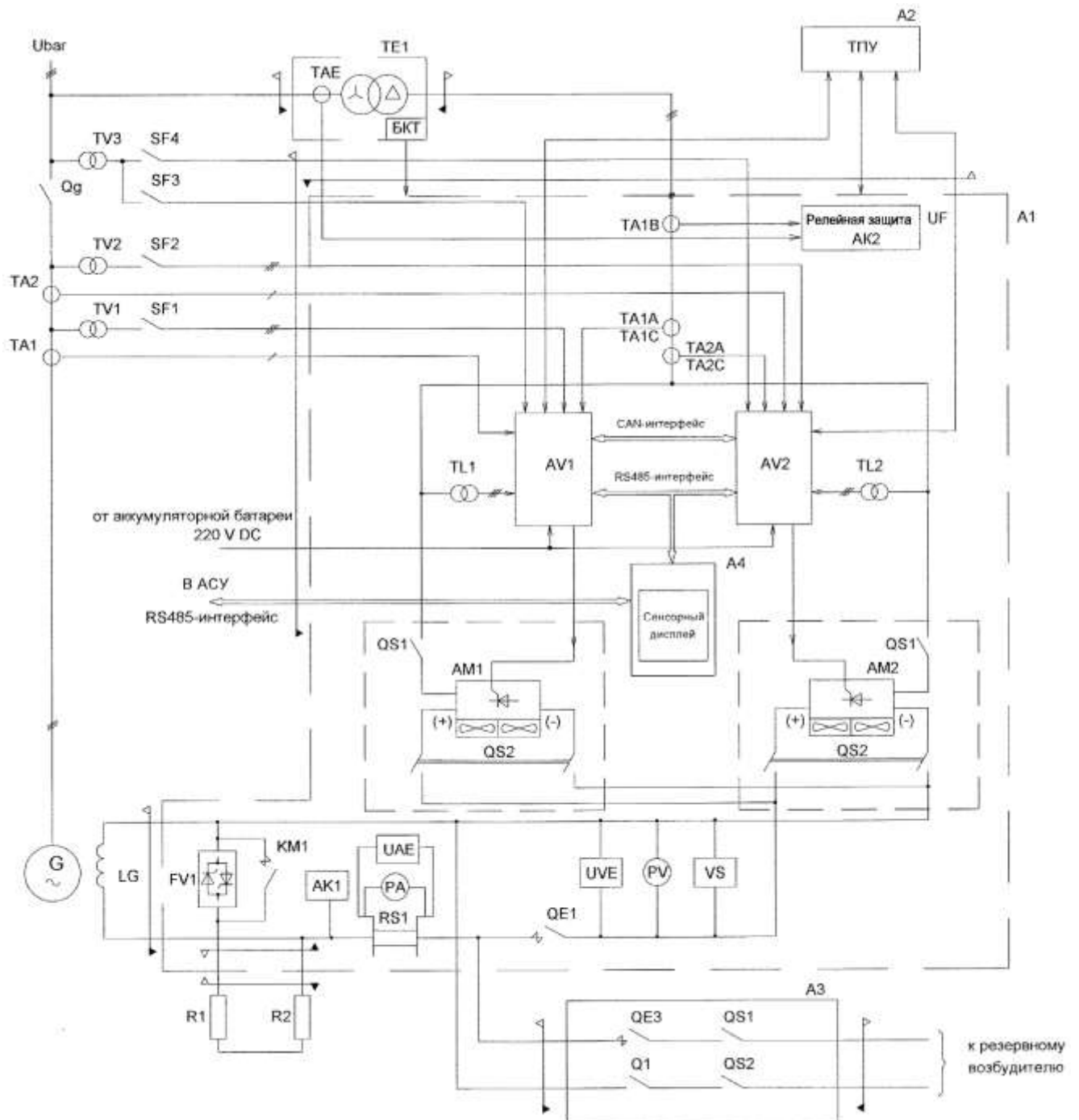


Рисунок 2.6 - Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения СТСН-2П-270-1900-2,5

Описание элементов функциональной схемы на рис.2.6:

TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:

ТАЕ - Трансформаторы тока;

БКТ - Блок контроля температуры.

A1 - Щит системы возбуждения в составе:

AV1 и AV2 - Автоматические регуляторы тока;

SF1,2,3,4 - Автоматические выключатели;

RS1 – Шунт;

РА – Амперметр;

PV – Вольтметр;

ТА1 и ТА2 (ф.А, В, С) - Трансформаторы тока;

TL1 и TL2 - Трансформаторы собственных нужд;

UF - Устройство защит;

UAE, UVE - Измерительные преобразователи;

QS1, QS2 – Разъединители.

A3 - 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.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для определения сопротивления сети, с которой связан преобразователь, необходимо найти сопротивления генератора и трансформатора возбуждения [11]. Для расчета токов короткого замыкания необходимо определить сопротивление блочного трансформатора. Схема замещения сети, с которой связан преобразователь, представлена на рисунке 2.7.

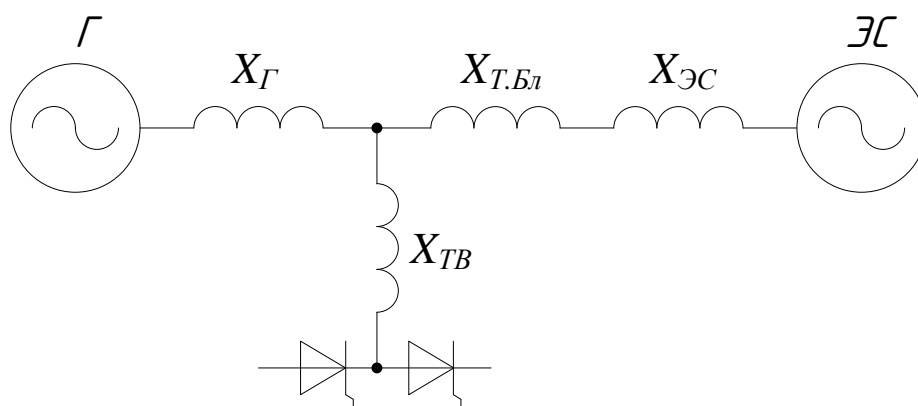


Рисунок 2.7 - Схема замещения сети, с которой связан преобразователь

Сопротивление генератора, приведенное к напряжению 270 В:

$$X_{Г(270)} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \cdot X_d'' \cdot \frac{U_d^2}{U_{НОМ}^2}; \quad (2.35)$$

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

$$X_{Г(270)} = \frac{15,75^2}{188,2} \cdot 0,21 \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 8,13 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$



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

$$X_{\text{т.бл}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{200} = 0,136 \text{ (Ом)};$$

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 270 В:

$$X_{\text{т.бл}(270)} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{т.бл.нн}}^2}{S_{\text{т.бл}}} \cdot \frac{U_d^2}{U_{\text{т.бл.нн}}^2}; \quad (2.36)$$

$$X_{\text{т.бл}(270)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{200} \cdot \frac{0,27^2}{15,75^2} = 4,01 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Для определения сопротивления трансформатора возбуждения производится его выбор. Мощность трансформатора возбуждения:

$$S_{\text{т.в.}} = \frac{I_d U_d}{\cos(70)}; \quad (2.37)$$

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

$$S_{\text{т.в.}} = \frac{1\,900 \cdot 270}{\cos(70)} = 1,5 \text{ (МВА)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Выбирается трансформатор ТСЗП-1600/15,75 - трансформатор сухой защищенный, выполненный по заказу, так как напряжение вторичной обмотки не входит в ряд стандартных значений напряжения [7].

Таблица 7 - Технические характеристики трансформатора ТСЗП-1600/15,75

$S_{НОМ}$ , МВА	$U_{ВН}$ , кВ	$U_d$ , кВ	$u_k$ , %
1,6	15,75	0,27	5,5

Сопротивление трансформатора возбуждения, приведенное к стороне НН:

$$X_{Т.В.} = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{Т.В.НН}^2}{S_{Т.В.}}; \quad (2.38)$$

$$X_{Т.В.} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,27^2}{1,6} = 2,51 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

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

$$X_{\gamma(270)} = X_{Т.В.} + X_{Г(270)}; \quad (2.39)$$

$$X_{\gamma(270)} = 2,51 \cdot 10^{-3} + 8,133 \cdot 10^{-5} = 2,59 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

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

фазное напряжение выпрямителя:

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d - \frac{3}{\pi} X_{\gamma(270)} I_d; \quad (2.40)$$

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 270 - \frac{3}{\pi} \cdot 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1745 = 111,12 \text{ (В)};$$

ЭДС преобразователя:

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} U_d}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}}; \quad (2.41)$$

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

ток двухфазного КЗ в преобразователе:

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{2 X_{\gamma(270)}}; \quad (2.42)$$

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 111,12}{2 \cdot 2,59 \cdot 10^{-3}} = 52,6 \text{ (кА)};$$

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах:

$$I_d^* = \frac{I_d}{I_{2km}}; \quad (2.43)$$

$$I_d^* = \frac{1\,745}{52\,600} = 0,036 \text{ (о.е.)};$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах:

$$X_\gamma = \frac{X_{\gamma(270)} I_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{E_{2л}}; \quad (2.44)$$

$$X_\gamma = \frac{2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,745 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{199,93} = 0,03 \text{ (о.е.)};$$

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:  
номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,03 \cdot (2,5 - 1)}{2,5} \right] = 65,9^\circ,$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_\phi = \arccos [2 \cdot \cos(65,9)] = 35,1^\circ;$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{ГН} = \arccos[-\cos(15) + 0,03] = 159,4^\circ;$$

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

$$K_{ГН} = \frac{\cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03}{\cos(65,9) - 0,5 \cdot 0,03} = -2,41;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{ГФ} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,03] = 154,9^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{ГФ} = \frac{\cos(154,9) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,03}{\cos(65,9) - 0,5 \cdot 0,03} = -2,38.$$

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

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

$$I_{dНОМ}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dНОМ}^* = \cos(65,9) - 0,5 \cdot 0,03 = 0,394 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$I_{d\Pi}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,03 = 0,985 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,03 = 0,06 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(35,1) - 0,5 \cdot 0,06 = 0,788 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{dГН}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГН}^* = \cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03 = -0,951 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{dГ\Phi}^* = 2 \cdot 0,03 = 0,06 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГ\Phi}^* = \cos(154,9) - 0,5 \cdot 0,06 = -0,936 \text{ (о.е.).}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Представим внешние характеристики СТС генератора ТЗФГ-160-2М на рисунке 2.8.

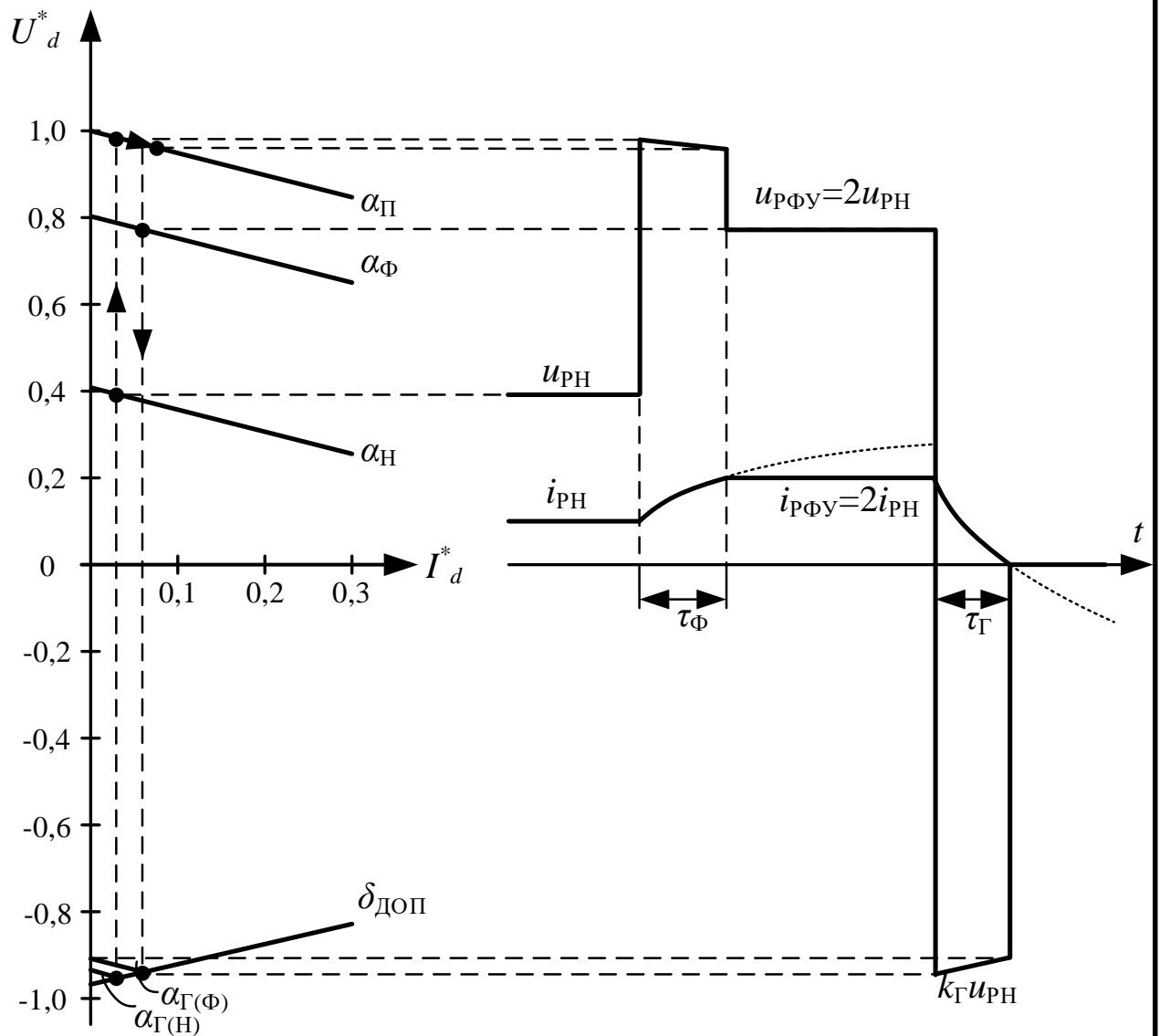


Рисунок 2.8 - Внешние характеристики СТС генератора ТЗФГ-160-2М

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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{188,2}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 6,9 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 160^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 99,1^2 + 0,277\right)^2} = 1,48 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 6,9 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{3} = 17,72 \text{ (кВ)}.$$

Рассмотрим КЗ за выводами ВН блочного трансформатора, тогда сопротивление от генератора до точки КЗ примем равное:

$$X_{\text{КЗ}} = 0,2 \text{ (Ом)};$$

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

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{E_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{КЗ}}}; \quad (2.45)$$

где по формуле (2.24):

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,2 + 0,277 = 0,477 \text{ (Ом)};$$

тогда ток КЗ будет равен:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{17,72}{0,477 \cdot \sqrt{3}} = 21,45 \text{ (кА)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



тогда напряжение на выводах генератора будет определяться как:

$$U'_{\Gamma} = E_{\text{НОМ}} - I_{\text{КЗ}} \cdot X_{\Gamma} \cdot \sqrt{3}; \quad (2.46)$$

$$U'_{\Gamma} = 17,72 - 21,45 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 7,43 \text{ (кВ)};$$

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

$$X'_{\text{кр}} = \frac{X_{\Gamma}}{\frac{E_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} - 1}; \quad (2.47)$$

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,277}{\frac{17,72}{15,75} - 1} = 2,22 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{КЗ}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) 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 2.9 – 2.11.

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:

$$E_2 = \frac{U'_{\Gamma}}{K_{\text{Т.ТВ}}}; \quad (2.48)$$

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$K_{Т.ТВ} = \frac{U_{ТВ.ВН}}{U_{ТВ.НН}}; \quad (2.49)$$

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

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{7\,430}{58,33} = 127,37 \text{ (В)}.$$

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:

$$u_d = 2,34 \cdot E_2 \cdot \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X_{\gamma(270)} \cdot I_{d.\text{НОМ}}; \quad (2.50)$$

$$u_d = 2,34 \cdot 127,37 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,745 = 293,73 \text{ (В)}.$$

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

$$i_d = \frac{u_d}{R_{\text{обм.рот.}}}; \quad (2.51)$$

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Омическое сопротивление обмотки ротора:

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{U_{d.\text{НОМ}} - \Delta u_{\text{щкка}}}{I_{d.\text{НОМ}}}; \quad (2.52)$$

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

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{260 - 3}{1745} = 0,147 \text{ (Ом)};$$

тогда ток обмотки ротора будет равен:

$$i_d = \frac{293,73}{0,147} = 1998 \text{ (А)}.$$

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

$$E_{\Gamma(1)} = K_f \cdot i_d; \quad (2.53)$$

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

$$K_f = \frac{E_{\text{НОМ}}}{I_{d.\text{НОМ}}}; \quad (2.54)$$

$$K_f = \frac{17720}{1745} = 10,15 \left(\frac{\text{В}}{\text{А}}\right).$$

Тогда новое значение ЭДС генератора будет равно:

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$E_{Г(1)} = 10,15 \cdot 1998 = 20\,281 \text{ (В)}.$$

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:

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

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

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

$$I_{кз(1)} = \frac{20\,281}{\sqrt{3} \cdot 0,477} = 24\,548 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно:

$$U'_{Г(1)} = 20\,281 - 24\,548 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 8\,503 \text{ (В)}.$$

Полученное напряжение  $U'_{Г(1)}$  больше напряжения на выводах генератора в момент возникновения КЗ  $U_{Г}$ . 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 увеличению ЭДС генератора  $E_{Г}$  и соответственно напряжения на выводах  $U_{Г}$ . Увеличение напряжения на выводах увеличивает ЭДС

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

Так как напряжение на выводах возросло до 8 503 В, то увеличится и ЭДС преобразователя:

$$E_{2(1)} = \frac{8\,503}{58,33} = 145,78(\text{В}).$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя увеличивается, то возрастает и напряжение тиристорного преобразователя по формуле (2.50):

$$u_{d(1)} = 2,34 \cdot 145,78 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,998 = 336,18 (\text{В}).$$

Тогда ток в обмотке ротора будет равен по формуле (2.51):

$$i_{d(1)} = \frac{336,18}{0,147} = 2\,286 (\text{А}).$$

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

$$E_{T(2)} = 10,15 \cdot 2\,286 = 23\,213 (\text{В}).$$

Ток трехфазного КЗ возрастет из-за увеличения ЭДС генератора по формуле (2.45):

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$I_{кз(2)} = \frac{23\ 213}{\sqrt{3} \cdot 0,477} = 28\ 096 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно по формуле (2.46):

$$U'_{Г(2)} = 23\ 213 - 28\ 096 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 9\ 733 \text{ (В)}.$$

Для наглядности сведем полученные данные в таблицу 8.

Таблица 8 – Полученные данные по итерационному процессу для генератора ТЗФГ-160-2М

Значение Величина	Момент возникновения КЗ	1 итерация	2 итерация
$u_d, \text{ В}$	260	293,73	336,18
$i_d, \text{ А}$	1745	1 998	2 286
$E_{Г}, \text{ В}$	17 720	20 281	23 213
$I_{кз}, \text{ А}$	21 450	24 548	28 096
$U_{Г}, \text{ В}$	7 430	8 503	9 733

Так как невозможно поднять ток ротора больше двукратного  $i_{d.max} = 2 \cdot I_{d.ном} = 2 \cdot 1\ 745 = 3\ 490 \text{ (А)}$ , 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  $X_{кз} = 0,161 \text{ Ом}$ . При сопротивлении 0,161 Ом или

меньше напряжение на выводах упадет до нуля, и система возбуждения не сможет его восстановить.

Результаты расчета представлены в виде графика на рисунках 2.9-2.10.

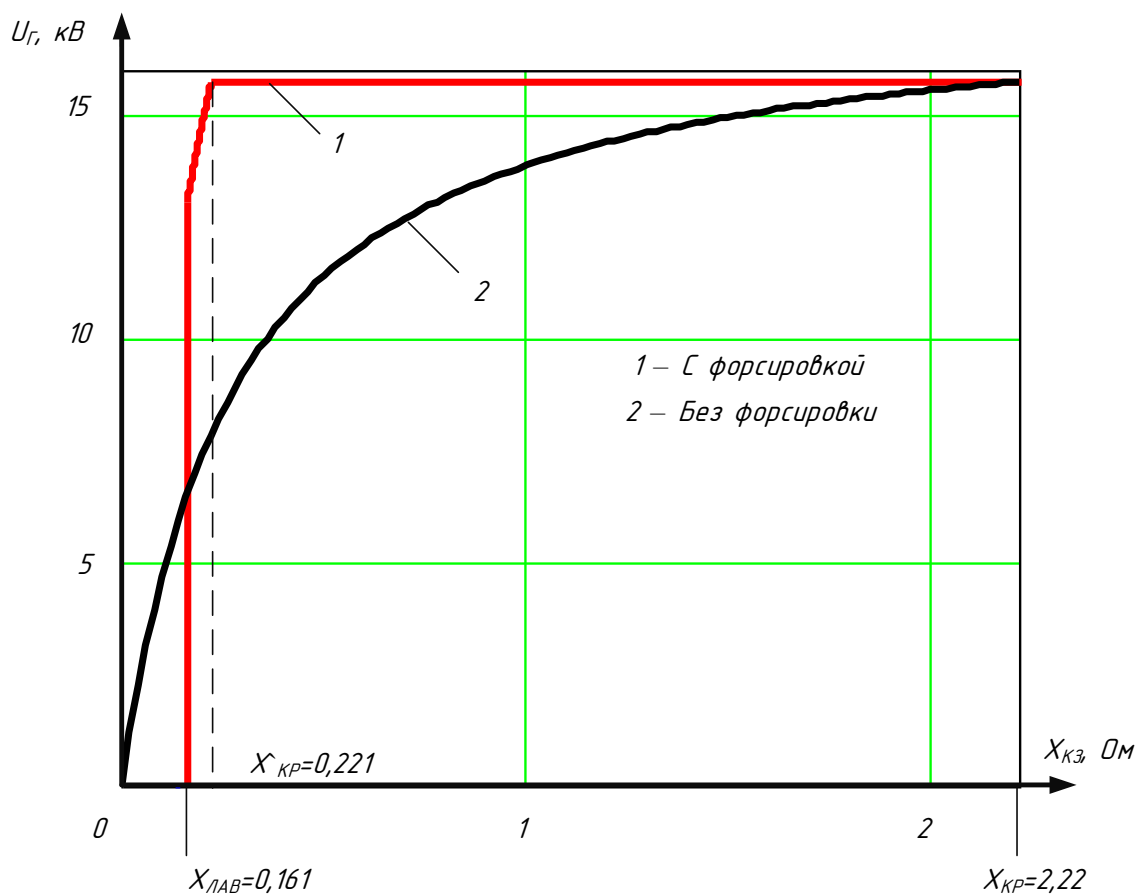


Рисунок 2.9 - Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФГ-160-2М от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{кз}=0..2,22$  (Ом)

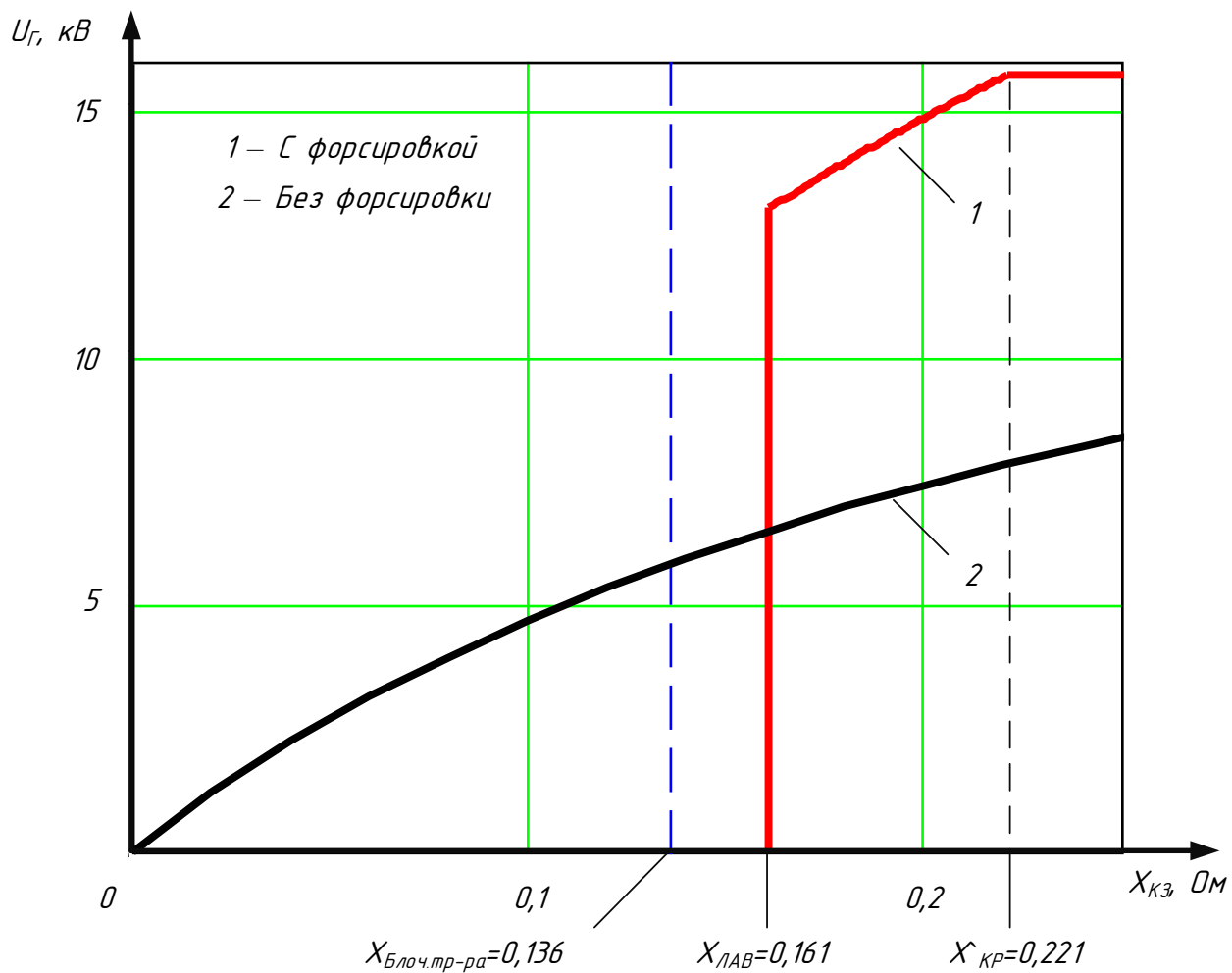


Рисунок 2.10 - Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФГ-160-2М от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{кз}=0..0,25$  (Ом)



На рисунке 2.11 приводится сравнение СТН и СТС для генератора ТЗФГ-160-2М.

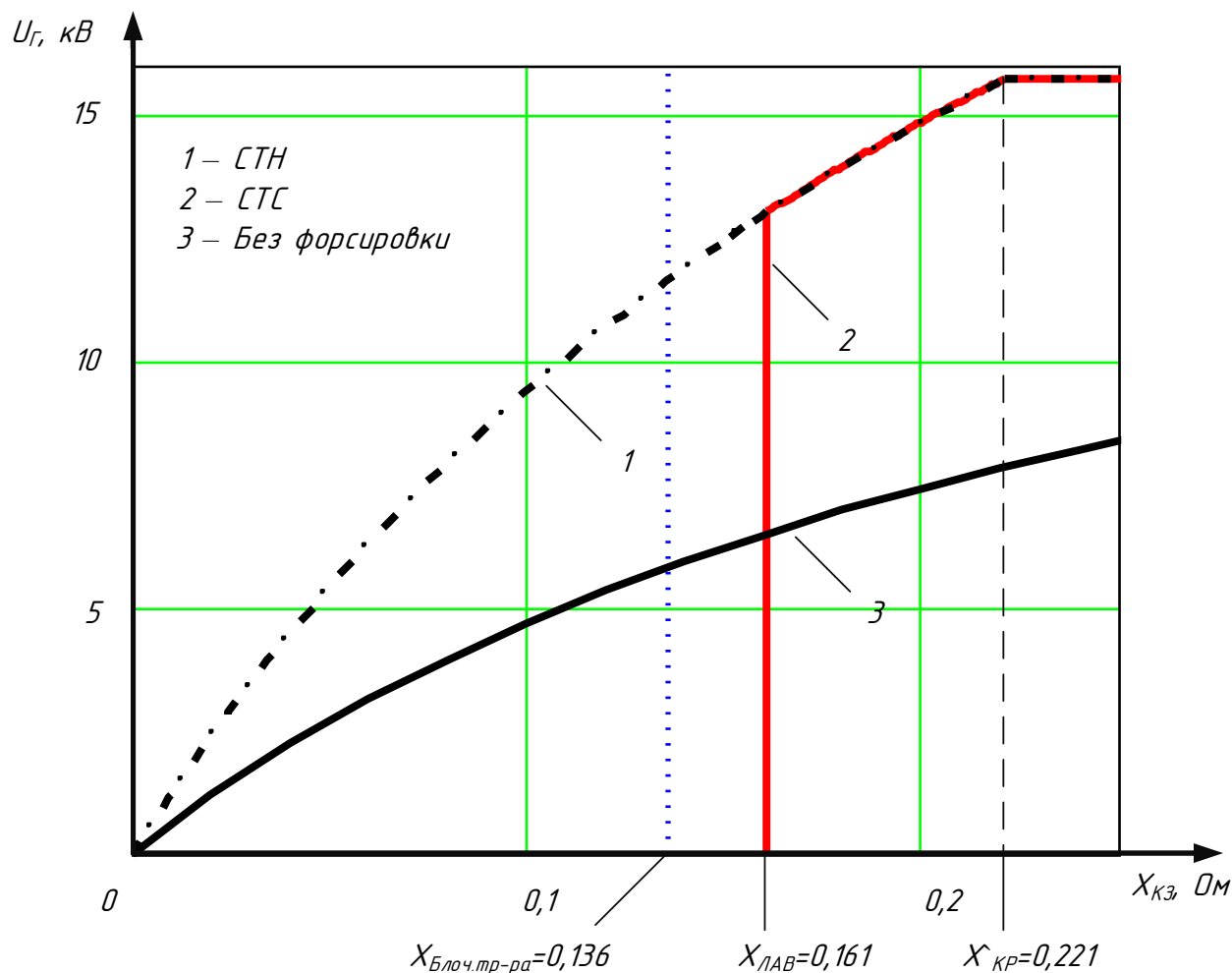


Рисунок 2.11 - Сравнение СТН и СТС для генератора ТЗФГ-160-2М

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 независимого возбуждения  
для генератора ТЗФП-63-2М

Исходные данные:

номинальный ток возбуждения генератора  $I_d=800$  А;

номинальное напряжение возбуждения генератора  $U_d=325$  В;

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

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

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

Схема системы тиристорной независимого возбуждения приведена на рис.2.1.

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

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

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

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

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

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

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

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

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

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

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

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

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

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

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

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

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

$$I_{d\Pi}^* = 0,08 \text{ (о.е.);}$$

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

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

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

$$I_{dГН}^* = 0,08 \text{ (о.е.);}$$

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

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

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

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

Далее производится расчет номинального режима работы генератора:

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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,33 \text{ (кА);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 63^2\right)^2 + \left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 47,25^2 + 0,19\right)^2} = 1,52 \text{ (Ом);}$$

номинальная ЭДС генератора определяется по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 4,33 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} = 11,41 \text{ (кВ).}$$

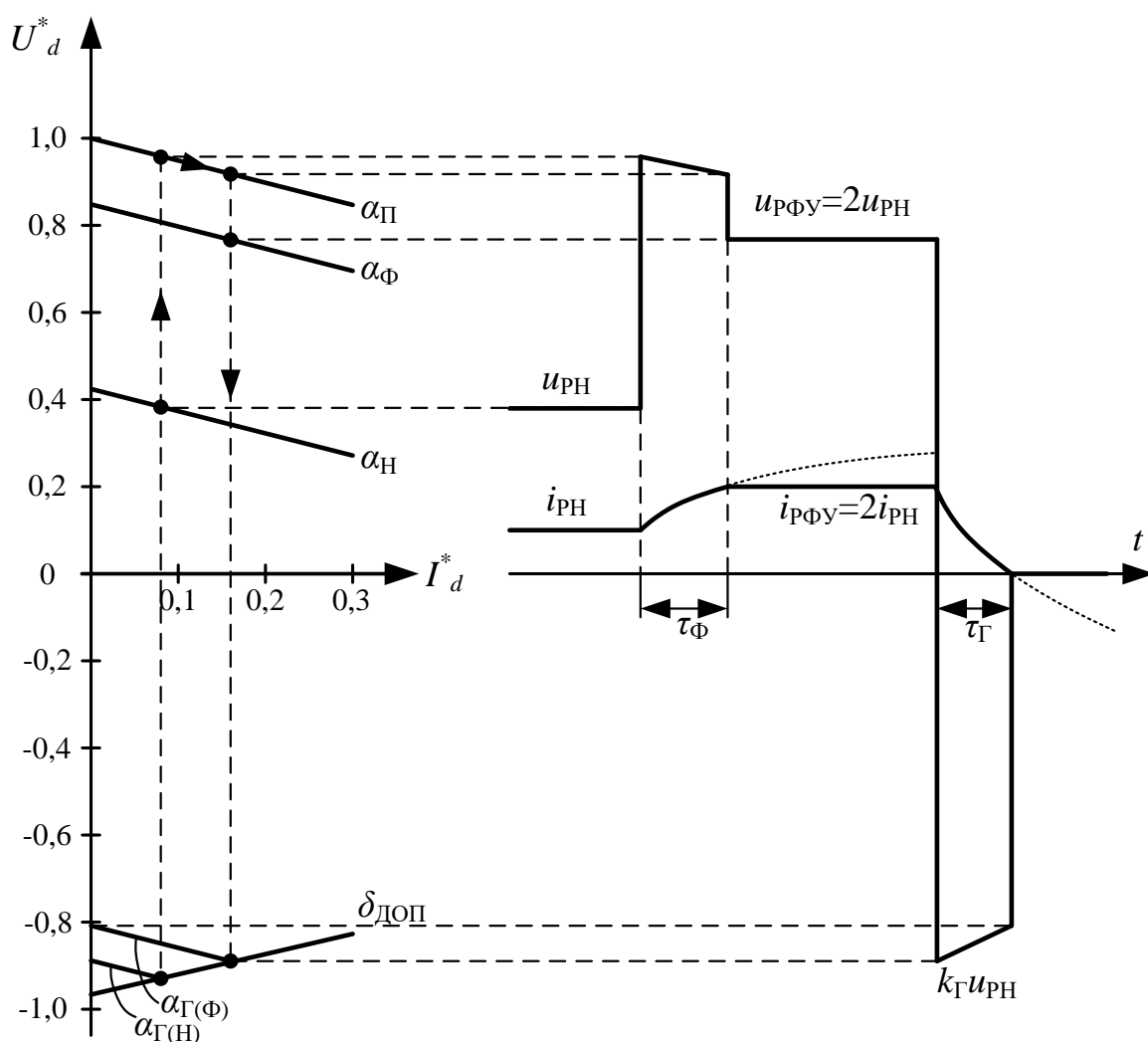


Рисунок 2.12 - Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТН генератора ТЗФГ-63-2М

		Поснов А.А.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00035.ВКР

Лист

48

Далее производится расчет режима короткого замыкания и определение критического сопротивления:

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 10,5 кВ по формуле (2.22):

$$X_{Т.бл} = \frac{11}{100} \cdot \frac{10,5^2}{80} = 0,152 \text{ (Ом)}.$$

Схема замещения цепи генератор-энергосистема показана на рисунке 2.13.

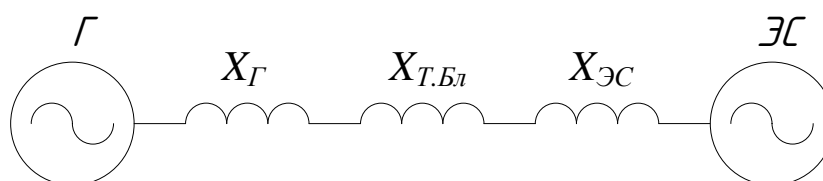


Рисунок 2.13 - Схема замещения цепи генератор-энергосистема

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

$$X_{кз} = 0,152 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ по формуле (2.23):

$$I_{кз} = \frac{2 \cdot 11,41}{0,342 \cdot \sqrt{3}} = 38,52 \text{ (кА)};$$

базисный ток по формуле (2.25):

$$I_{\sigma} = \frac{800}{0,08} = 10 \text{ (кА)};$$

базисное напряжение по формуле (2.26):

$$U_{\sigma} = \frac{325}{0,384} = 846,35 \text{ (В)};$$

ток ротора в режиме форсировки по формуле (2.27):

$$I_p = 2 \cdot 800 = 1600 \text{ (А)};$$

ток ротора в режиме форсировки в относительных единицах по формуле (2.28):

$$I'_p = \frac{1,6}{10} = 0,16 \text{ (о.е.)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки по формуле (2.29):

$$U_p = 1600 \cdot \frac{325}{800} = 650 \text{ (В)};$$

напряжение на обмотке возбуждения в режиме форсировки в относительных единицах по формуле (2.30):

$$U'_p = \frac{650}{846,35} = 0,768 \text{ (о.е.)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

угол в режиме форсировки по формуле (2.31):

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

напряжение на выводах генератора в режиме форсировки по формуле (2.32):

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot 11,41 \cdot \frac{0,152}{0,152 + 0,19} = 10,12 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора, определяется по формуле (2.33):

$$X_{\text{кр}} = \frac{0,19}{\frac{2 \cdot 11,414}{10,5} - 1} = 0,162 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. Зависимость показана на рисунке 2.14.

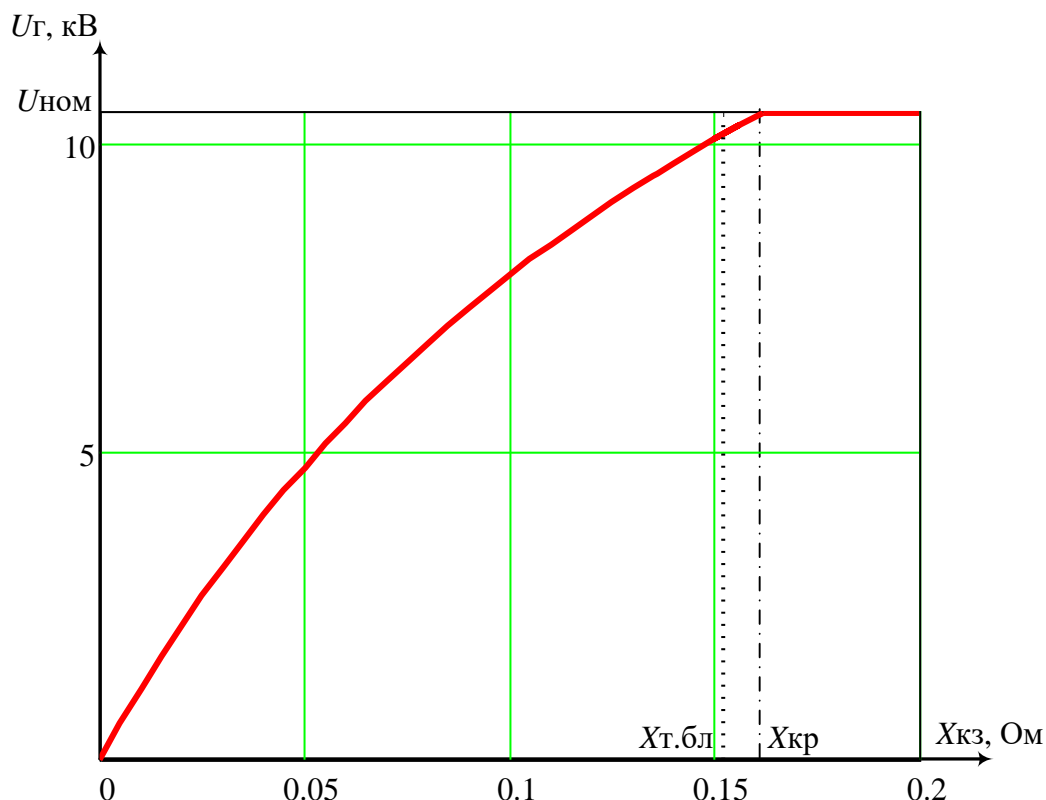


Рисунок 2.14 - Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФП-63-2М от удаленности места КЗ для СТН



## 2.4 Система тиристорная самовозбуждения для генератора ТЗФП-63-2М

Исходные данные:

номинальный ток возбуждения генератора  $I_d=800$  А;

номинальное напряжение возбуждения генератора  $U_d=325$  В;

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

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

Схема системы тиристорной самовозбуждения приведена на рис.2.5.

В качестве рабочей системы выбирается СТСН-2П-350-1000-2,5 как наиболее подходящая для данного генератора [13].

Таблица 9 – Основные технические характеристики СТСН-2П-350-1000-2,5

Длительно допустимое напряжение системы возбуждения, В	350
Длительно допустимый ток системы возбуждения, А	1 000
Кратность форсировки по напряжению, $K_{\Pi}$	2,5
Кратность форсировки по току, $K_i$	2,0
Длительность режима форсировки, с, не более	20
Тип охлаждения тиристорного преобразователя	Принудительное воздушное
Количество преобразовательно-регулирующих каналов	2
Число параллельных тиристоров в плече	1
Марка тиристора	T173-1600-36-T1E2
Верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, °С	40

Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения  
СТСН-2П-350-1000-2,5 представлена на рисунке 2.15.

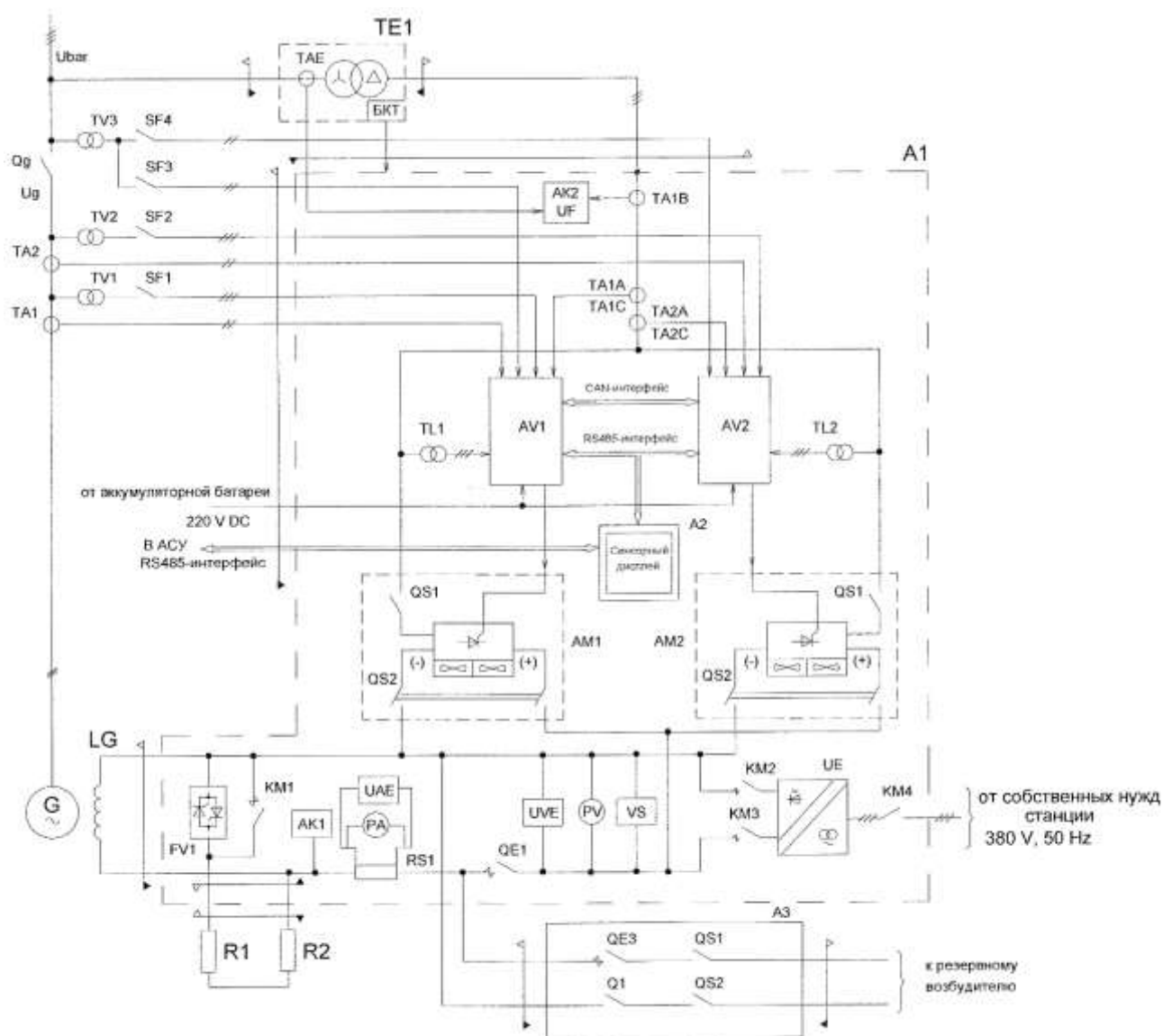


Рисунок 2.15 - Функциональная схема системы тиристорной самовозбуждения  
СТСН-2П-350-1000-2,5

Описание элементов функциональной схемы на рис.2.15:

TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:

ТАЕ - Трансформаторы тока;

БКТ - Блок контроля температуры.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А1 - Щит системы возбуждения в составе:

AV1 и AV2 - Автоматические регуляторы тока;  
KM2,3,4 – Контакторы;  
SF1,2,3,4 - Автоматические выключатели;  
RS1 – Шунт;  
РА – Амперметр;  
PV – Вольтметр;  
ТА1 и ТА2 (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.

Силовая схема тиристорной секции состоит из двух силовых тиристорных мостов. Тиристорный мост представляет собой трехфазный полностью

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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 определения сопротивления сети, с которой связан преобразователь, необходимо определить сопротивления генератора и трансформатора возбуждения. Для расчета токов короткого замыкания необходимо найти сопротивление блочного трансформатора. Схема замещения сети, с которой связан преобразователь представлена на рисунке 2.16.

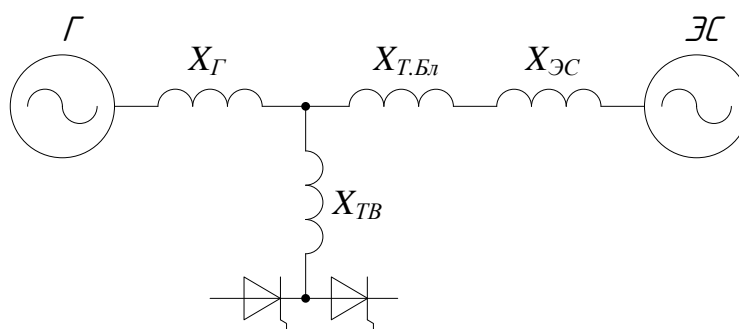


Рисунок 2.16 - Схема замещения сети, с которой связан преобразователь

Сопротивление генератора, приведенное к напряжению 350 В, по формуле (2.35):

$$X_{Г(325)} = \frac{10,5^2}{78,75} \cdot 0,136 \cdot \frac{0,35^2}{10,5^2} = 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 10,5 кВ, по формуле (2.21):

$$X_{\text{т.бл}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{10,5^2}{80} = 0,152 \text{ (Ом)};$$

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 350 В по формуле (2.36):

$$X_{\text{т.бл}(325)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{10,5^2}{80} \cdot \frac{0,35^2}{10,5^2} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Для определения сопротивления трансформатора возбуждения производится его выбор. Мощность трансформатора возбуждения по формуле (2.37):

$$S_{\text{т.в.}} = \frac{1000 \cdot 350}{\cos(70)} = 1 \text{ (МВА)}.$$

Выбирается трансформатор ТСЗП-1000/10,5 - трансформатор сухой защищенный, выполненный по заказу, так как напряжение вторичной обмотки не входит в ряд стандартных значений напряжения [7].

Таблица 10 - Технические характеристики трансформатора ТСЗП-1000/10,5

$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	$U_{\text{ВН}}$ , кВ	$U_d$ , кВ	$u_k$ , %
1,0	10,5	0,35	6,0

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Сопротивление трансформатора возбуждения, приведенное к стороне НН, по формуле (2.38):

$$X_{Т.В.} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,35^2}{1} = 7,35 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление сети, с которой связан преобразователь, приведенное к напряжению 350 В по формуле (2.39):

$$X_{\gamma(350)} = 7,35 \cdot 10^{-3} + 2,12 \cdot 10^{-4} = 7,56 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

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

фазное напряжение выпрямителя по формуле (2.40):

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 350 + \frac{3}{\pi} \cdot 7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 143,85 \text{ (В)} ;$$

ЭДС преобразователя по формуле (2.41):

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 350}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 259,17 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе по формуле (2.42):

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 143,85}{2 \cdot 7,56 \cdot 10^{-3}} = 23,3 \text{ (кА)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах по формуле (2.43):

$$I_d^* = \frac{800}{23\,300} = 0,043 \text{ (о.е.);}$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах по формуле (2.44):

$$X_\gamma = \frac{7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{259,17} = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:  
номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,036 \cdot (2,5 - 1)}{2,5} \right] = 65,75^\circ,$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_{\text{Ф}} = \arccos [2 \cdot \cos(65,75)] = 34,77^\circ;$$

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(15) + 0,036] = 158,5^\circ;$$

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

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(158,5) - 0,5 \cdot 0,036}{\cos(65,75) - 0,5 \cdot 0,036} = -2,41;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\Gamma\Phi} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,036] = 153,4^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\Gamma\Phi} = \frac{\cos(153,4) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,036}{\cos(65,75) - 0,5 \cdot 0,036} = -2,37.$$

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

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

$$I_{d\text{НОМ}}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\text{НОМ}}^* = \cos(65,75) - 0,5 \cdot 0,036 = 0,393 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d\Pi}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,036 = 0,982 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,036 = 0,072 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(34,77) - 0,5 \cdot 0,072 = 0,786 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



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

$$I_{dГН}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГН}^* = \cos(158,5) - 0,5 \cdot 0,036 = -0,948 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{dГФ}^* = 2 \cdot 0,036 = 0,072 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГФ}^* = \cos(153,4) - 0,5 \cdot 0,072 = -0,93 \text{ (о.е.).}$$

Далее производится расчет номинального режима работы генератора:

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

$$I_{НОМ} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,33 \text{ (кА);}$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 63^2\right)^2 + \left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 47,25^2 + 0,19\right)^2} = 1,52 \text{ (Ом);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 4,33 \cdot 1,522 \cdot \sqrt{3} = 11,41 \text{ (кВ)}.$$

Представим внешние характеристики СТС генератора ТЗФП-63-2М на рисунке 2.17.

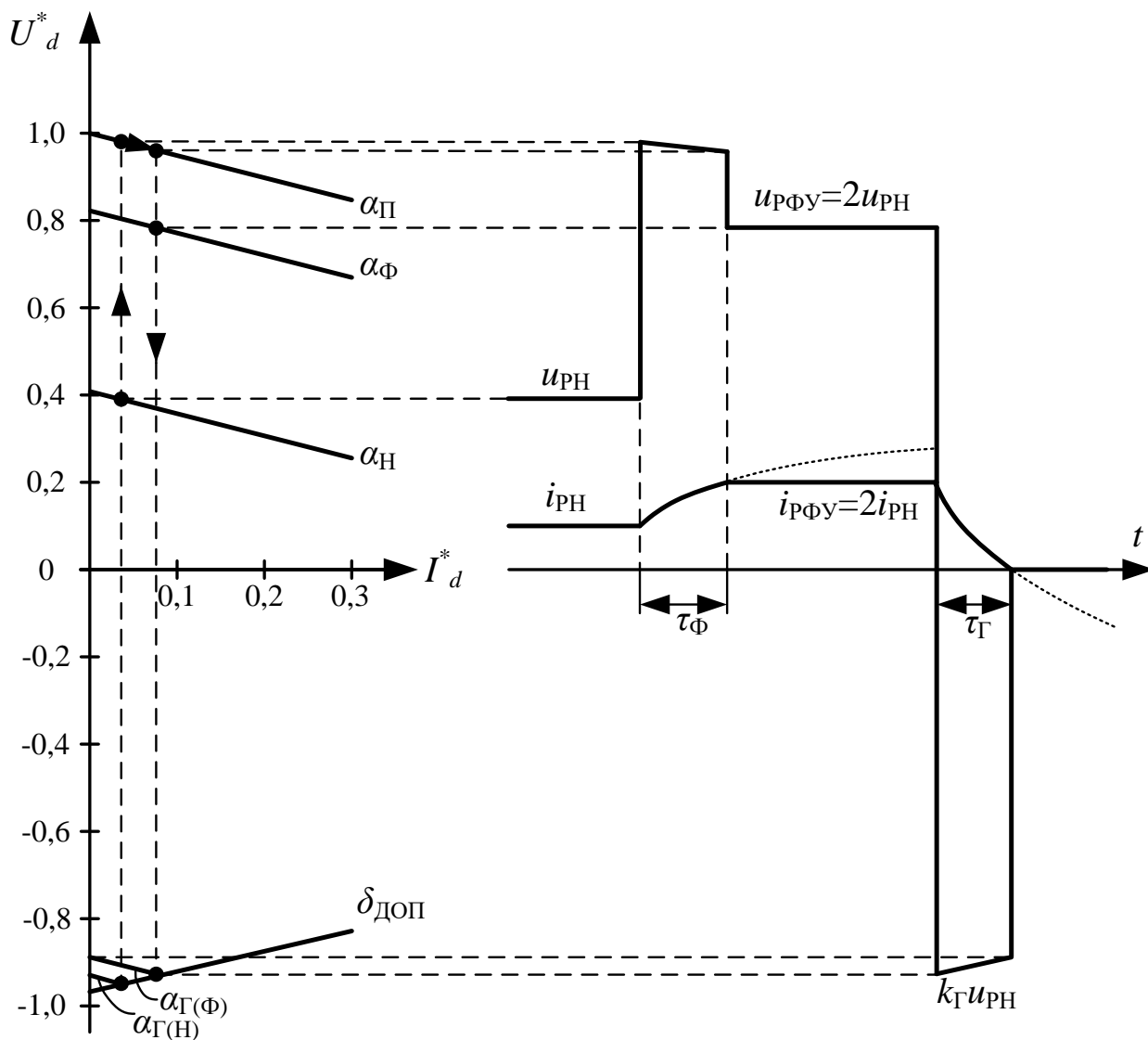


Рисунок 2.17 - Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТС генератора ТЗФП-63-2М

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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4\,330(\text{А});$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 63^2\right)^2 + \left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 47,25^2 + 0,277\right)^2} = 1,52 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 4,33 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} = 11,41 \text{ (кВ)}.$$

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

$$X_{\text{КЗ}} = 0,152 \text{ (Ом)};$$

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,152 + 0,19 = 0,342 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась по формуле (2.45):

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{11,41}{0,342 \cdot \sqrt{3}} = 19,26 \text{ (кА)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда напряжение на выводах генератора будет определяться по формуле (2.46):

$$U'_{\Gamma} = 11,41 - 19,26 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 5,07 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.47):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,19}{\frac{11,41}{10,5} - 1} = 2,19 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) 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 2.18 - 2.20.

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 формуле (2.48):

$$E_2 = \frac{5\,070}{30} = 169 \text{ (В)}.$$

Коэффициент трансформации трансформатора возбуждения по формуле (2.49):

$$K_{\text{т.тв}} = \frac{10,5}{0,35} = 30.$$

Так как ЭДС тиристорного преобразователя уменьшается, то уменьшается и напряжение тиристорного преобразователя при номинальном токе возбуждения,

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

но такое недопустимо, так как последует снижение тока обмотки ротора, поэтому уменьшаем угол  $\alpha$  до 0 град.эл., т.е. переходим в режим форсировки, по формуле (2.50):

$$u_d = 2,34 \cdot 169 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 389,68(\text{В}).$$

Омическое сопротивление обмотки ротора, Ом, определяется по формуле (2.52):

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{325 - 3}{800} = 0,403 (\text{Ом});$$

тогда ток обмотки ротора будет равен по формуле (2.51):

$$i_d = \frac{389,68}{0,403} = 966,95 (\text{А}).$$

Коэффициент, учитывающий зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения. Он определяется по формуле (2.54):

$$K_f = \frac{11\,410}{800} = 14,27 \left(\frac{\text{В}}{\text{А}}\right).$$

Тогда новое значение ЭДС генератора будет равно по формуле (2.53):

$$E_{T(1)} = 14,27 \cdot 966,95 = 13\,796 (\text{В}).$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ. Ток трехфазного короткого замыкания при новом значении ЭДС генератора:

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$I_{кз(1)} = \frac{13\,796}{\sqrt{3} \cdot 0,342} = 23\,291 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно:

$$U'_{Г(1)} = 13\,796 - 23\,291 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 6\,131 \text{ (В)}.$$

Полученное напряжение  $U'_{Г(1)}$  больше напряжения на выводах генератора в момент возникновения КЗ  $U'_Г$ . Это показывает, что форсировка поднимает напряжение на выводах генератора. Но так как напряжение стало больше, то и ЭДС преобразователя станет больше, т.е. процесс циклический и итерационный. 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 увеличению ЭДС генератора  $E_G$  и соответственно напряжения на выводах  $U_G$ . 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:  $\alpha=0 \Rightarrow u_d \uparrow \Rightarrow i_d \uparrow \Rightarrow E_G \uparrow \Rightarrow U_G \uparrow \Rightarrow E_2 \uparrow \Rightarrow u_d \uparrow \Rightarrow i_d \uparrow$ .

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. Для примера далее представлен расчет, по которому видно, что процесс действительно протекает так, как описано выше.

Так как напряжение на выводах возросло до 6 131 В, то увеличится и ЭДС преобразователя:

$$E_{2(1)} = \frac{6\,131}{30} = 204,38 \text{ (В)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так как ЭДС тиристорного преобразователя увеличивается, то возрастает и напряжение тиристорного преобразователя по формуле (2.50):

$$u_{d(1)} = 2,34 \cdot 204,38 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 966,95 = 471,27 \text{ (В)}.$$

Тогда ток в обмотке ротора будет равен по формуле (2.51):

$$i_{d(1)} = \frac{471,27}{0,403} = 1\,169 \text{ (А)}.$$

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

$$E_{r(2)} = 14,27 \cdot 1\,169 = 16\,687 \text{ (В)}.$$

Ток трехфазного КЗ возрастет из-за увеличения ЭДС генератора по формуле (2.45):

$$I_{кз(2)} = \frac{16\,687}{\sqrt{3} \cdot 0,342} = 28\,171 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно по формуле (2.46):

$$U'_{r(2)} = 16\,687 - 28\,171 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 7\,416 \text{ (В)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для наглядности сведем полученные данные в таблицу 11.

Таблица 11 – Полученные данные по итерационному процессу для генератора ТЗФП-63-2М

Значение Величина	Момент возникновения КЗ	1 итерация	2 итерация
$u_d, В$	325	389,68	471,27
$i_d, А$	800	966,95	1 169
$E_T, В$	11 410	13 796	16 687
$I_{кз}, А$	19 260	23 291	28 171
$U_T, В$	5 070	6 131	7 416

Так как невозможно поднять ток ротора больше двукратного  $i_{d.max} = 2 \cdot I_{d.ном} = 2 \cdot 800 = 1\,600$  (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 «лавинной напряжением», и в данном случае она возникает при  $X_{кз} = 0,111$  Ом. При сопротивлении 0,111 Ом или меньше напряжение на выводах упадет до нуля, и система возбуждения не сможет его восстановить.

Результаты расчета представлены в виде графика на рисунках 2.18-2.20.



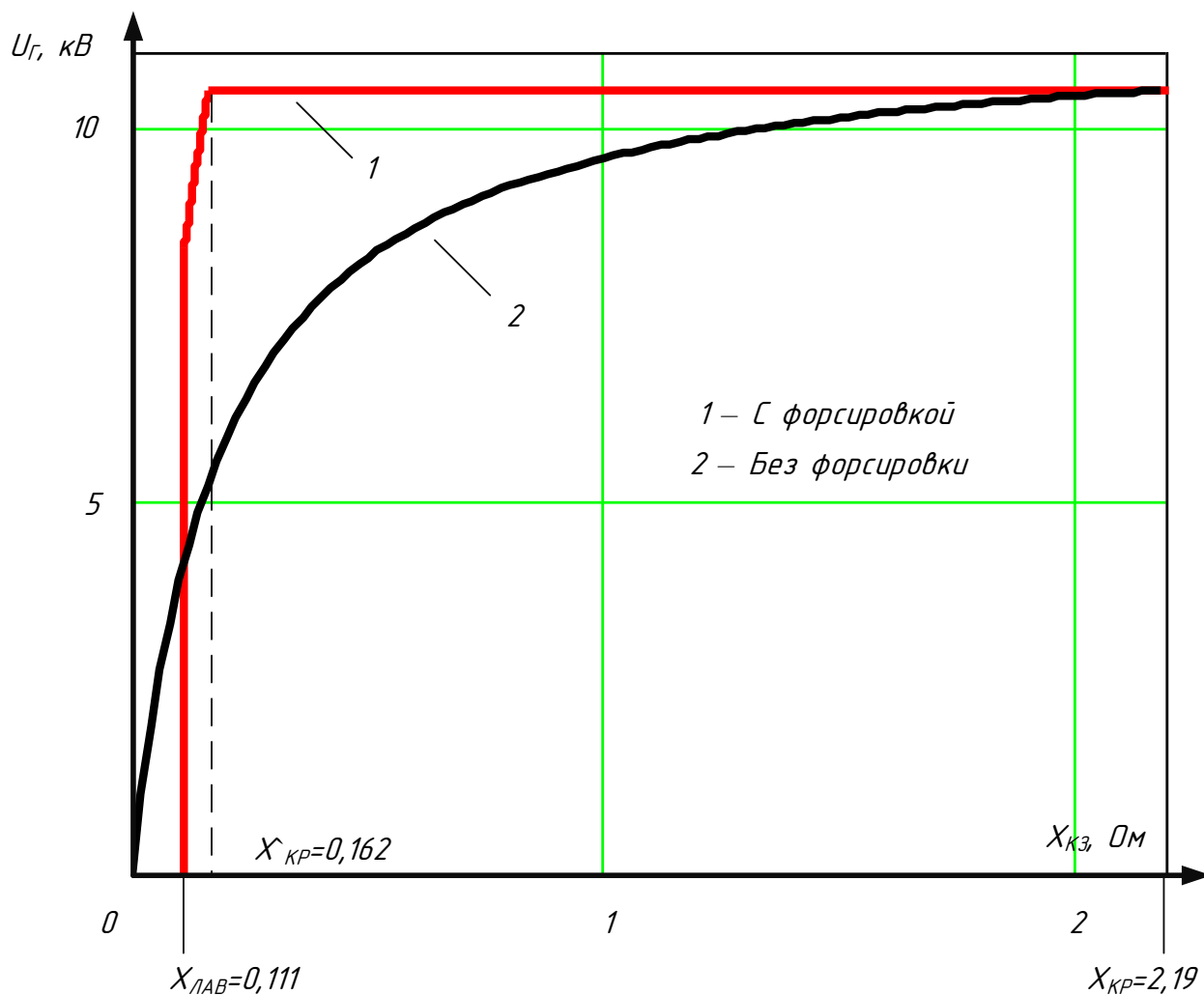


Рисунок 2.18 - Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФП-63-2М от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{кз}=0..2,19$  (Ом)

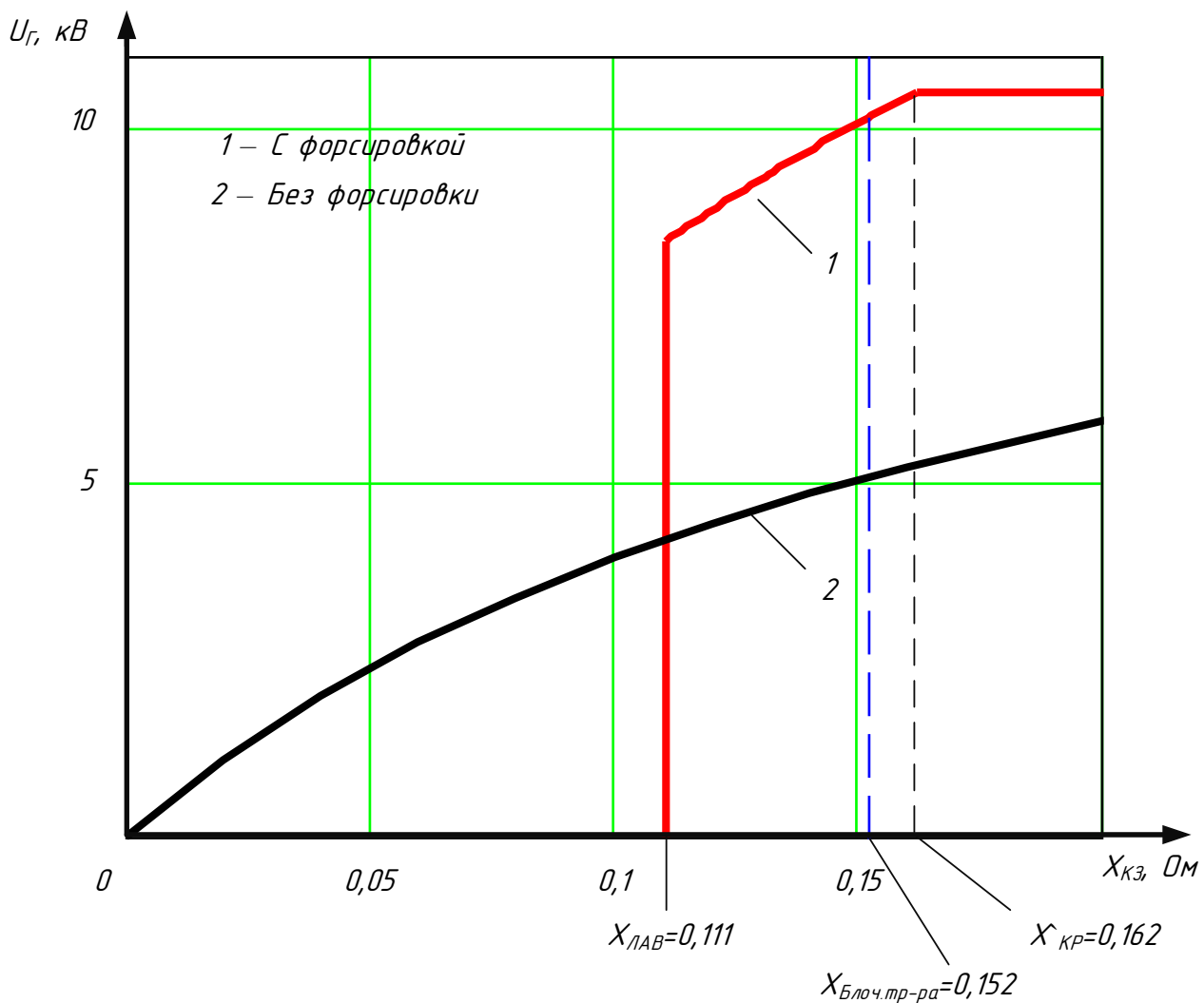


Рисунок 2.19 - Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФП-63-2М от удаленности места КЗ для СТС при  $X_{кз}=0..0,2$  (Ом)

На рисунке 2.20 приводится сравнение СТН и СТС для генератора ТЗФП-63-2М.

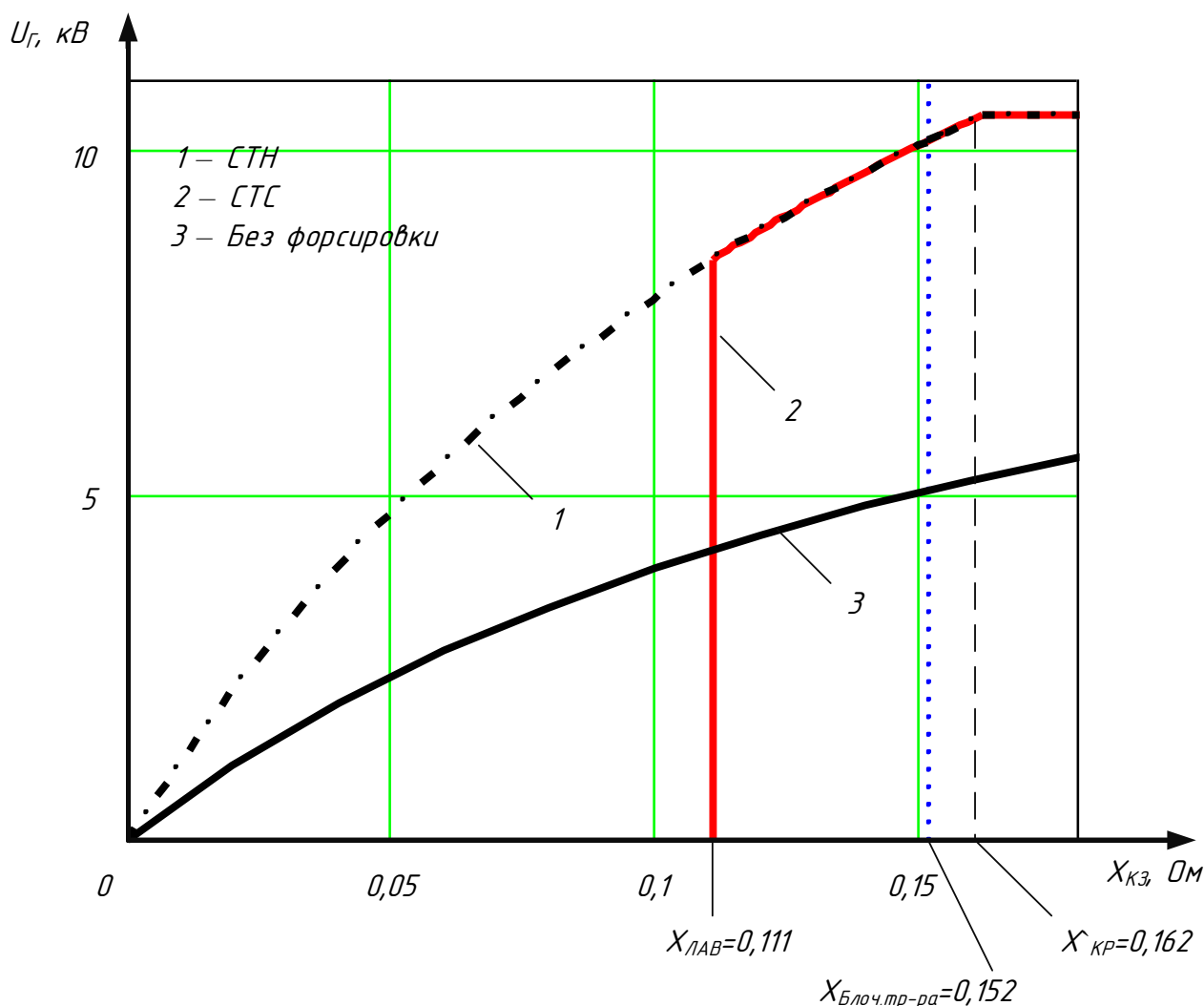


Рисунок 2.20 - Сравнение СТН и СТС для генератора ТЗФП-63-2М

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, как и в п.2.2 - что СТН может восстановить напряжение на выводах генератора при более близких КЗ, чем СТС. Однако, СТН имеет ряд недостатков, которые ранее уже были указаны, поэтому в соответствии с опытом проектирования электростанций были приняты к установке именно СТС.

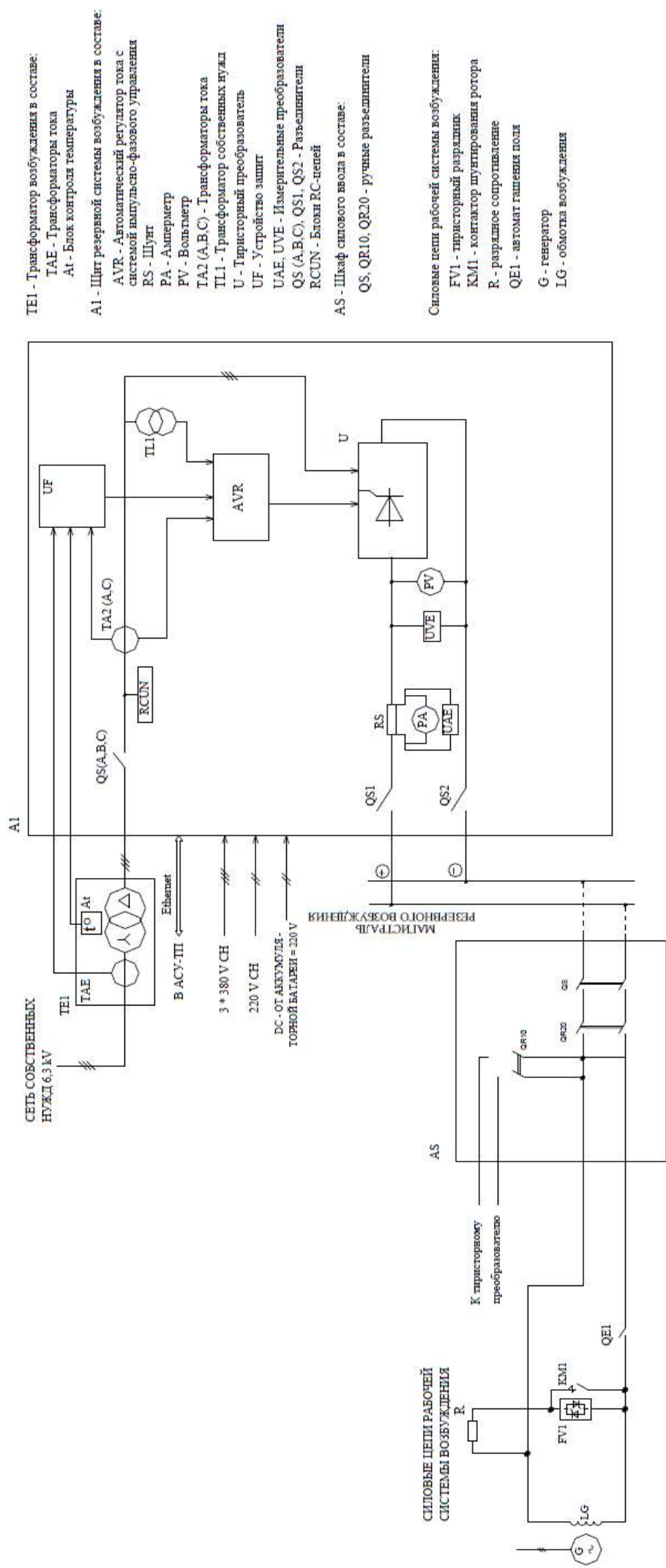
### 3 СИСТЕМА ТИРИСТОРНАЯ РЕЗЕРВНАЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Для генераторов производится расчет и анализ режимов работы системы тиристорной резервной самовозбуждения (СТРС). Резервная система возбуждения предназначена для случаев, когда основная система возбуждения вследствие неисправности или технического обслуживания выведена из работы. В качестве такой системы выбирается СТСП-1Е-350-2050-2 согласно каталогу [13]. Основные технические характеристики СТСП приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Основные технические характеристики СТСП-1Е-350-2050-2

Длительно допустимое напряжение системы возбуждения, В	350
Длительно допустимый ток системы возбуждения, А	2 050
Кратность форсировки по напряжению, $K_{\Pi}$	2,0
Кратность форсировки по току, $K_i$	2,0
Длительность режима форсировки, с, не более	20
Тип охлаждения тиристорного преобразователя	Естественное воздушное
Количество преобразовательно-регулирующих каналов	1
Число параллельных тиристоров в плече	1
Марка тиристора	T283-2500-32
Верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, °С	40

Функциональная схема СТСП-1Е-350-2050-2 с пояснениями представлена на рис.3.1.



- TE1 - Трансформатор возбуждения в составе:  
 TAE - Трансформаторы тока  
 AT - Блок контроля температуры
- A1 - Шит 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 - Тирсторный 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 3.1 – Схема функциональная система тиристорной самовозбуждения резервной  
 СТСП-1Е-350-2050-2

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
			Поснов А. А.	
			Гольдштейн М.Е.	

13.04.02.2017.00035.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 [19].

### 3.1 Работа генератора ТЗФГ-160-2М с резервной системой возбуждения

Исходные данные:

номинальный ток обмотки ротора генератора  $I_f=1\ 745\ \text{A}$ ;

номинальное напряжение обмотки ротора генератора  $U_f=260\ \text{V}$ ;

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. Схема замещения сети, с которой связан преобразователь представлена на рисунке 3.2.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

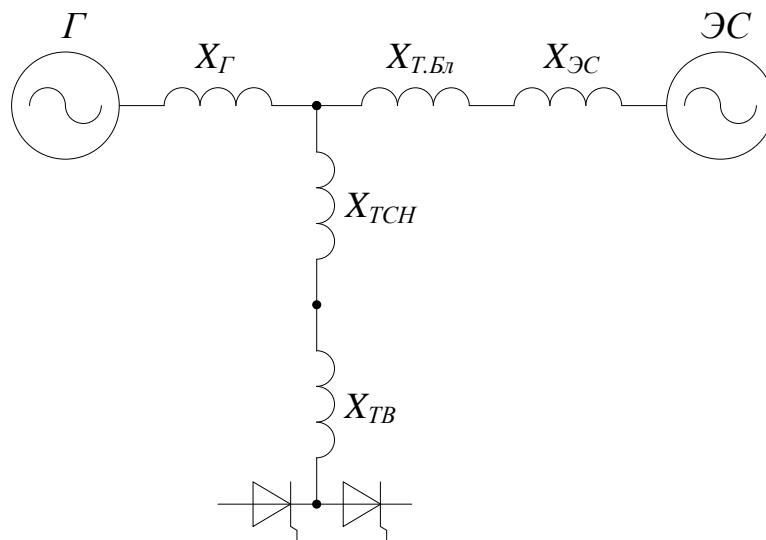


Рисунок 3.2 – Схема замещения сети, с которой связан преобразователь

Сопротивление генератора, приведенное к напряжению 350 В, по формуле (2.35):

$$X_{Г(350)} = \frac{15,75^2}{188,2} \cdot 0,21 \cdot \frac{0,35^2}{15,75^2} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

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

$$X_{Т.бл} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{200} = 0,136 \text{ (Ом)};$$

сопротивление блочного трансформатора, приведенное к напряжению 350 В по формуле (2.36):

$$X_{Т.бл(350)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{15,75^2}{200} \cdot \frac{0,35^2}{15,75^2} = 6,74 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$X_{\text{ТСН}} = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_{\text{ТСН.ВН}}^2}{S_{\text{ТСН}}}; \quad (2.55)$$

$$X_{\text{ТСН}} = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,419 \text{ (Ом)};$$

сопротивление ТСН, приведенное к напряжению 350 В:

$$X_{\text{ТСН}(350)} = X_{\text{ТСН}} \frac{U_d^2}{U_{\text{ТСН.ВН}}^2}; \quad (2.56)$$

$$X_{\text{ТСН}(350)} = 0,419 \cdot \frac{0,35^2}{10,5^2} = 4,66 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}.$$

Для определения сопротивления трансформатора возбуждения производится его выбор. Мощность трансформатора возбуждения по формуле (2.37):

$$S_{\text{Т.В.}} = \frac{350 \cdot 2050}{\cos(70)} = 2,1 \text{ (МВА)}.$$

Выбирается трансформатор ТСЗП-2500/6,3 – трансформатор сухой защищенный для возбудителей, выполненный по заказу, так как напряжение вторичной обмотки не входит в ряд стандартных значений напряжения [7].

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Таблица 13 – Технические характеристики трансформатора ТСЗП-2500/6,3

$S_{НОМ}$ , МВА	$U_{ВН}$ , кВ	$U_d$ , кВ	$u_K$ , %
2,5	6,3	0,35	6

Сопротивление трансформатора возбуждения, приведенное к стороне НН по формуле (2.38):

$$X_{Т.В.} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,35^2}{2,5} = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

Далее определяется сопротивление сети, с которой связан преобразователь, приведенное к напряжению 350 В по формуле:

$$X_{\gamma(350)} = X_{Т.В.} + X_{ТСН(350)} + X_{Г.ПАР(350)}; \quad (2.57)$$

где  $X_{Г.ПАР(350)}$  – сопротивление генератора ТЗФП-63-2М, равное  $2,12 \cdot 10^{-4}$  Ом, которое приведено к напряжению 350 В, так как трансформатор собственных нужд подключен к выводам именно этого генератора.

$$X_{\gamma(350)} = 2,94 \cdot 10^{-3} + 4,66 \cdot 10^{-4} + 2,12 \cdot 10^{-4} = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

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

фазное напряжение выпрямителя по формуле (2.40):

$$U_{2\Phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 350 - \frac{3}{\pi} \cdot 3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 1745 = 143,6 \text{ (В)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЭДС преобразователя по формуле (2.41):

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 350}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 259,2 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе по формуле (2.42):

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 143,6}{2 \cdot 3,62 \cdot 10^{-3}} = 48,62 \text{ (кА)};$$

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах по формуле (2.43):

$$I_d^* = \frac{1745}{48620} = 0,036 \text{ (о.е.)};$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах по формуле (2.44):

$$X_\gamma = \frac{3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 1745 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{259,2} = 0,03 \text{ (о.е.)};$$

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,03 \cdot (2 - 1)}{2} \right] = 59,5^\circ,$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

режим форсировки из номинального по формуле (2.2)

$$\alpha_{\text{ф}} = \arccos[2 \cdot \cos(59,5)] = 9,9^\circ;$$

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos[-\cos(15) + 0,03] = 159,4^\circ;$$

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

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03}{\cos(59,5) - 0,5 \cdot 0,03} = -1,93;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\text{Гф}} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,03] = 155,0^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\text{Гф}} = \frac{\cos(155,0) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,03}{\cos(59,5) - 0,5 \cdot 0,03} = -1,9.$$

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

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

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$* U_{d \text{ ном}} = \cos(59,5) - 0,5 \cdot 0,03 = 0,493 \text{ (о.е.);}$$

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

$$* I_{d \text{ II}} = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$* U_{d \text{ II}} = 1 - 0,5 \cdot 0,03 = 0,985 \text{ (о.е.);}$$

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

$$* I_{d \text{ ф}} = 2 \cdot 0,03 = 0,06 \text{ (о.е.);}$$

$$* U_{d \text{ ф}} = \cos(9,9) - 0,5 \cdot 0,06 = 0,985 \text{ (о.е.);}$$

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

$$* I_{d \text{ ГН}} = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$* U_{d \text{ ГН}} = \cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03 = -0,951 \text{ (о.е.);}$$

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

$$* I_{d \text{ Гф}} = 2 \cdot 0,03 = 0,06 \text{ (о.е.);}$$

$$* U_{d \text{ Гф}} = \cos(155,0) - 0,5 \cdot 0,06 = -0,936 \text{ (о.е.).}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Покажем внешние характеристики СТРС на рисунке 3.3.

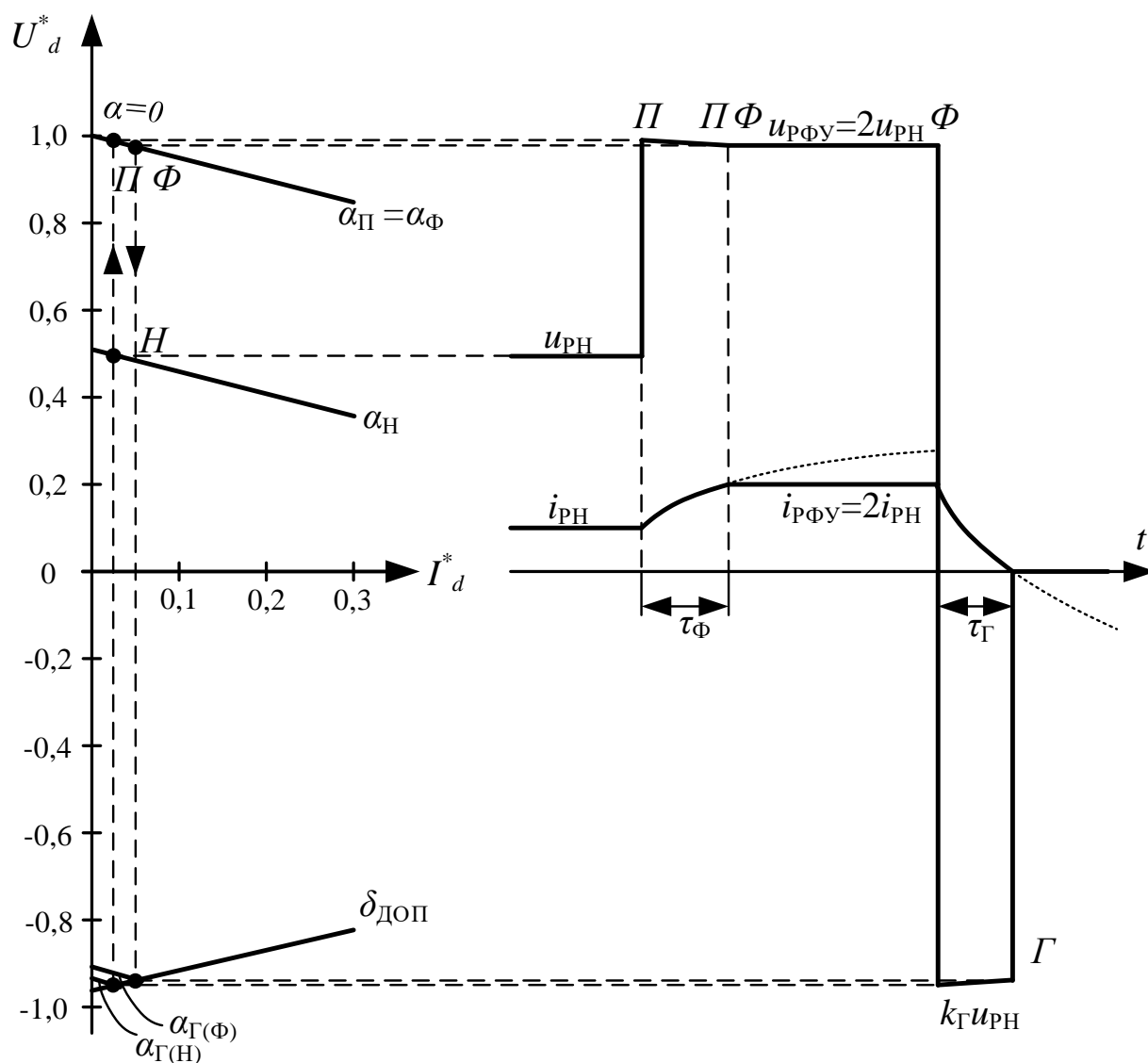


Рисунок 3.3 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТРС для генератора ТЗФГ-160-2М

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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{188,2}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 6,9 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18)

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 160^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 99,16^2 + 0,277\right)^2} = 1,48 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 6,9 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{3} = 17,72 \text{ (кВ)}.$$

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):

$$X_{\text{КЗ}} = 0,136 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась, по формуле (2.45):

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{17,72}{0,413 \cdot \sqrt{3}} = 24,77 \text{ (кА)};$$

напряжение на выводах генератора по формуле (2.46):

$$U'_{\Gamma} = 17,72 - 24,77 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 5,84 \text{ (кВ)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.47):

$$X'_{кр} = \frac{0,277}{\frac{17,72}{15,75} - 1} = 2,22 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{кз}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) строится график зависимости напряжения на выводах генератора от удаленности места КЗ ( $X_{кз}$ ) в момент возникновения КЗ, когда форсировка не началась. График показан на рисунках 3.4 - 3.6.

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

$$E_2 = \frac{U'_Г}{K_T}; \quad (2.58)$$

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

$$K_T = \frac{U_{т.бл.нн}}{U_{тв.нн}}; \quad (2.59)$$

$$K_T = \frac{15,75}{0,35} = 45.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{5\,840}{45} = 129,8 \text{ (В)}.$$

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 (2.50):

$$u_d = 2,34 \cdot 129,8 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,745 = 297,7 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда установили угол  $\alpha$  равный 0 град.эл., по формуле (2.51):

$$i_d = \frac{297,7}{0,147} = 2\,026 \text{ (А)}.$$

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора, по формуле (2.53):

$$E_{Г(1)} = 10,153 \cdot 2\,026 = 20\,562 \text{ (В)}.$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ, по формуле (2.45):

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$I_{кз(1)} = \frac{20\,562}{\sqrt{3} \cdot 0,413} = 28\,744 \text{ (A)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно (2.46):

$$U'_{Г(1)} = 20\,562 - 28\,744 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 6\,771 \text{ (В)}.$$

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

Результаты расчета приведены на рисунках ниже.

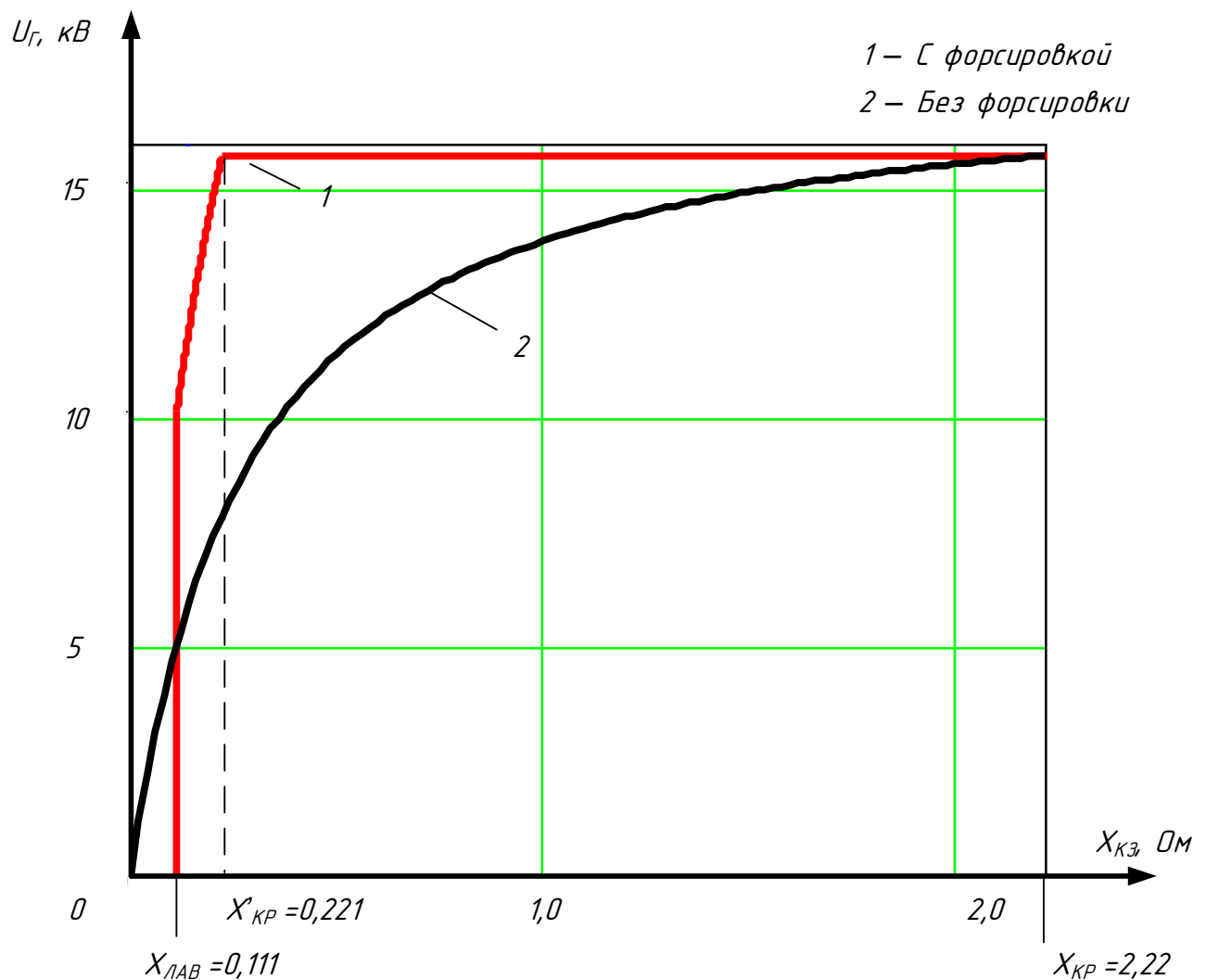


Рисунок 3.4 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФГ-160-2М от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{КЗ}=0..1,604$  (Ом)

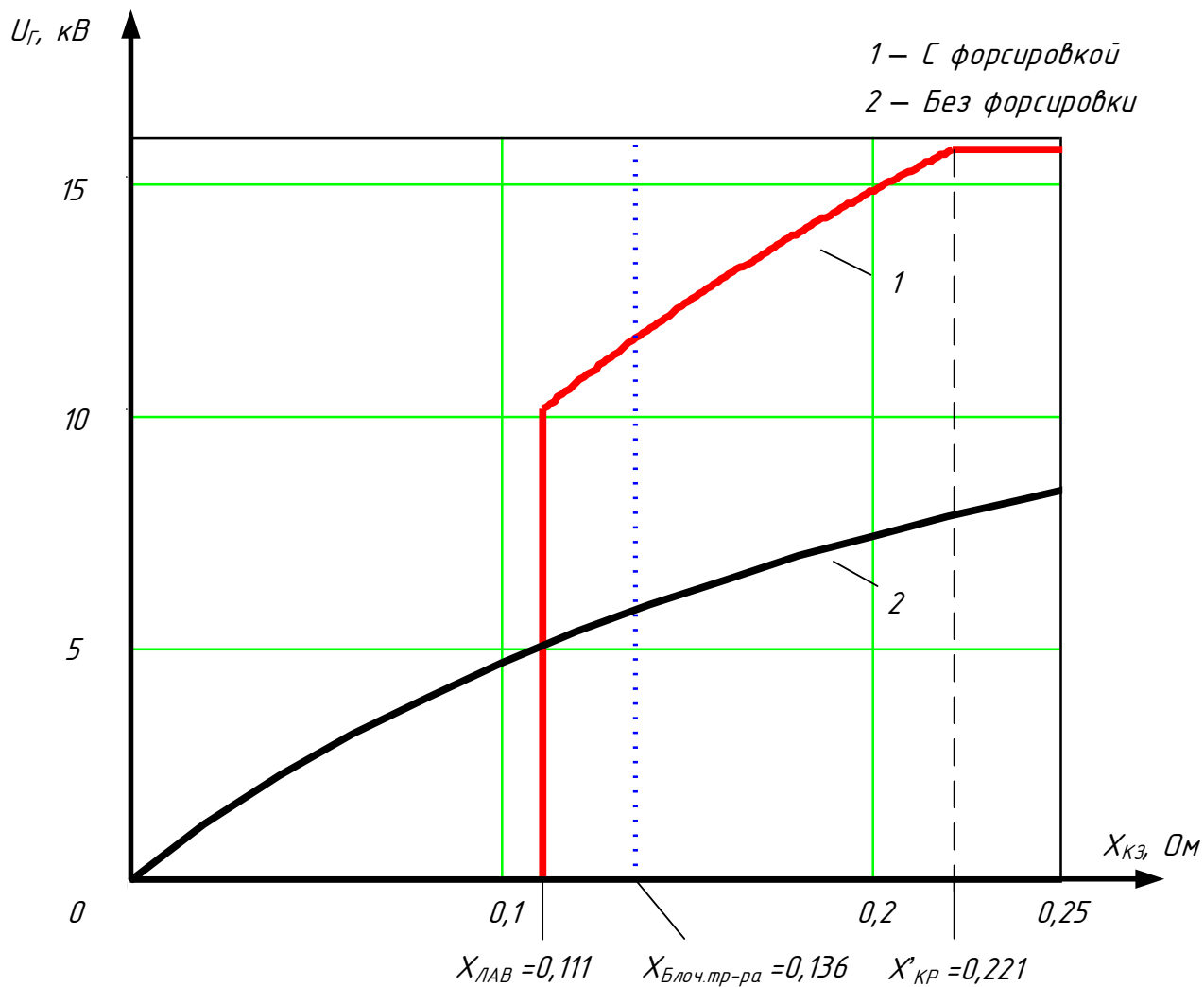


Рисунок 3.5 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФГ-160-2М от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{КЗ}=0..0,25$  (Ом)

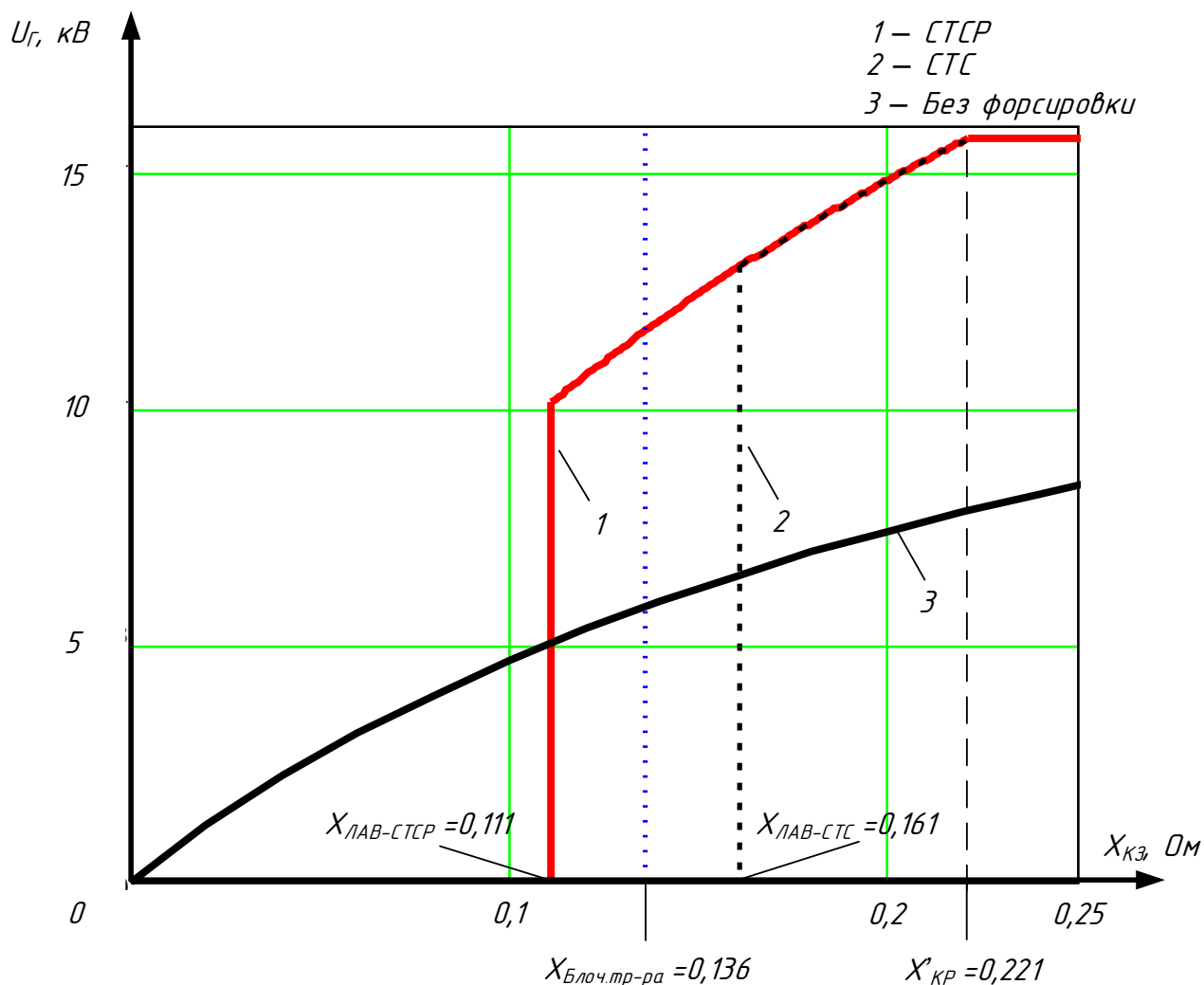


Рисунок 3.6 – Сравнение СТС и СТСР для генератора ТЗФГ-160-2М

Сравнивая полученные графики на рис.3.4 и 3.5 с графиками по СТС, можно сделать вывод, что при работе генератора ТЗФГ-160-2М с резервной системой возбуждения лавина напряжения может начаться намного позже, так как  $X_{Лав-СТС} = 0,161$  Ом, а  $X_{Лав-СТСР} = 0,111$  Ом. Это отличие позволяет удерживать генератор в сети при более близких коротких замыканиях, что существенно повышает надежность. При работе на резервной системе возбуждения близкие КЗ к блочному трансформатору уже не смогут вызвать лавину напряжения, а лишь снизят напряжение на выводах генератора. Это достигается за счет напряжения

$U_d=350$  В резервной системы возбуждения, в то время как  $U_d$  рабочей системы равно 270 В. Данный запас по напряжению позволяет нам значительно сдвинуть лавину.

Это решение рекомендуется использовать при проектировании энергоблоков, в частности добиваться чуть большего напряжения  $U_d$ , чтобы избежать таких ситуаций, как с генератором ТЗФГ-160-2М.

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3.2 Работа генератора ТЗФП-63-2М с резервной системой возбуждения

Исходные данные:

номинальный ток обмотки ротора генератора  $I_f=800$  А;

номинальное напряжение обмотки ротора генератора  $U_f=325$  В;

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

Сопротивление сети, с которой связан преобразователь, ( $X_\gamma$ ) в Ом было определено еще в п.3.1 согласно схеме замещения на рисунке 3.2. Далее, чтобы определить сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах, необходимо рассчитать:

фазное напряжение выпрямителя по формуле (2.40):

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 350 - \frac{3}{\pi} \cdot 3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 146,9 \text{ (В)};$$

ЭДС преобразователя по формуле (2.41):

$$E_{2\phi} = \frac{\sqrt{3} \cdot 350}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 259,2 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе по формуле (2.42):

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 146,9}{2 \cdot 3,62 \cdot 10^{-3}} = 49,73 \text{ (кА)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах по формуле (2.43):

$$I_d^* = \frac{800}{49\,730} = 0,016 \text{ (о.е.);}$$

сопротивление  $X_\gamma$  в относительных единицах по формуле (2.44):

$$X_\gamma = \frac{3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{259,2} = 0,014 \text{ (о.е.);}$$

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:  
номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,014 \cdot (2 - 1)}{2} \right] = 59,8^\circ,$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2)

$$\alpha_\Phi = \arccos [2 \cdot \cos(59,8)] = 6,7^\circ;$$

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(15) + 0,014] = 162,2^\circ;$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$K_{ГН} = \frac{\cos(162,2) - 0,5 \cdot 0,014}{\cos(59,8) - 0,5 \cdot 0,014} = -1,93;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{ГФ} = \arccos[-\cos(15) + 2 \cdot 0,014] = 159,8^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{ГФ} = \frac{\cos(159,8) - 0,5 \cdot 2 \cdot 0,014}{\cos(59,8) - 0,5 \cdot 0,014} = -1,92.$$

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

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

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,014 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ном}}^* = \cos(59,8) - 0,5 \cdot 0,014 = 0,497 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$I_{d\Pi}^* = 0,014 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Pi}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,014 = 0,993 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d\Phi}^* = 2 \cdot 0,014 = 0,028 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d\Phi}^* = \cos(6,7) - 0,5 \cdot 0,028 = 0,993 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{dГН}^* = 0,014 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГН}^* = \cos(162,2) - 0,5 \cdot 0,028 = -0,959 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{dГФ}^* = 2 \cdot 0,014 = 0,028 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dГФ}^* = \cos(159,8) - 0,5 \cdot 0,028 = -0,952 \text{ (о.е.).}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				91
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,33 \text{ (кА)};$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18)

$$Z = \sqrt{\left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 63^2\right)^2 + \left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 47,25^2 + 0,19\right)^2} = 1,52 \text{ (Ом)};$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 4,33 \cdot 1,522 \cdot \sqrt{3} = 11,41 \text{ (кВ)}.$$

Покажем внешние характеристики СТРС на рисунке 3.7.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				92
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

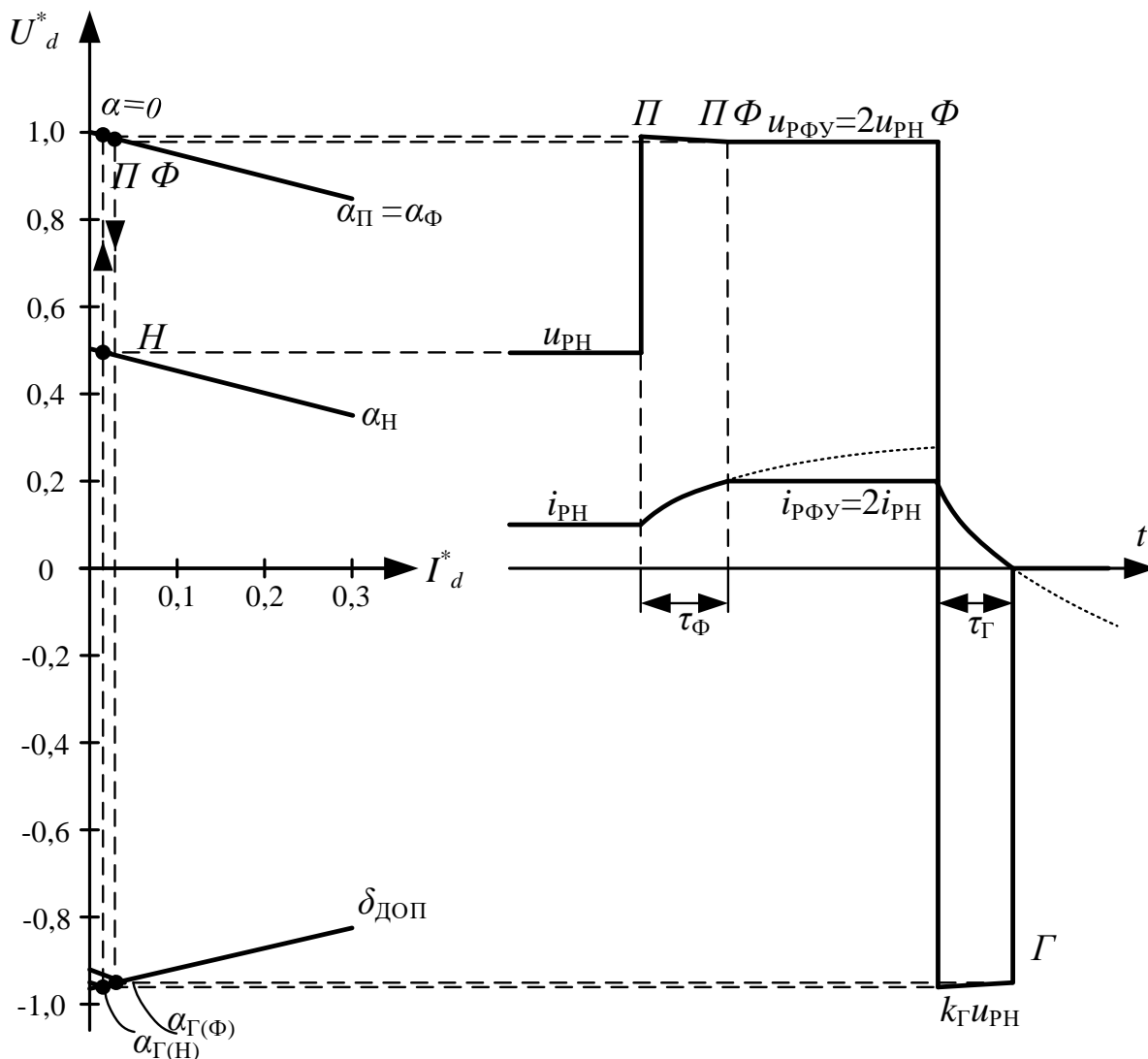


Рисунок 3.7 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТРС для ТЗФП-63-2М

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

$$X_{\text{КЗ}} = 0,152 \text{ (Ом)};$$

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,152 + 0,19 = 0,342 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась по формуле (2.45):

$$I_{\text{кз}} = \frac{11,41}{0,342 \cdot \sqrt{3}} = 19,26 \text{ (кА)};$$

тогда напряжение на выводах генератора будет определяться по формуле (2.46):

$$U'_{\Gamma} = 11,41 - 19,26 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 5,07 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.47):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,19}{\frac{11,41}{10,5} - 1} = 2,19 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) 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 3.8 - 3.11.

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 (2.58):

$$E_2 = \frac{5\ 070}{30} = 169 \text{ (В)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				94
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

коэффициент трансформации цепи от выводов генератора до преобразователя:

$$K_T = \frac{10,5}{0,35} = 30.$$

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 (2.50):

$$u_d = 2,34 \cdot 169 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 3,62 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 392,7 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда установили угол  $\alpha$  равный 0 град.эл., по формуле (2.51):

$$i_d = \frac{392,7}{0,403} = 974 \text{ (А)}.$$

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора, по формуле (2.53):

$$E_{Г(1)} = 14,268 \cdot 974 = 13\,903 \text{ (В)}.$$

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ, по формуле (2.45):

$$I_{КЗ(1)} = \frac{13\,903}{\sqrt{3} \cdot 0,342} = 23\,471 \text{ (А)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно (2.46):

$$U'_{Г(1)} = 13\,903 - 23\,471 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 6\,179 \text{ (В)}.$$

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

Результаты расчета приведены на рисунках ниже.

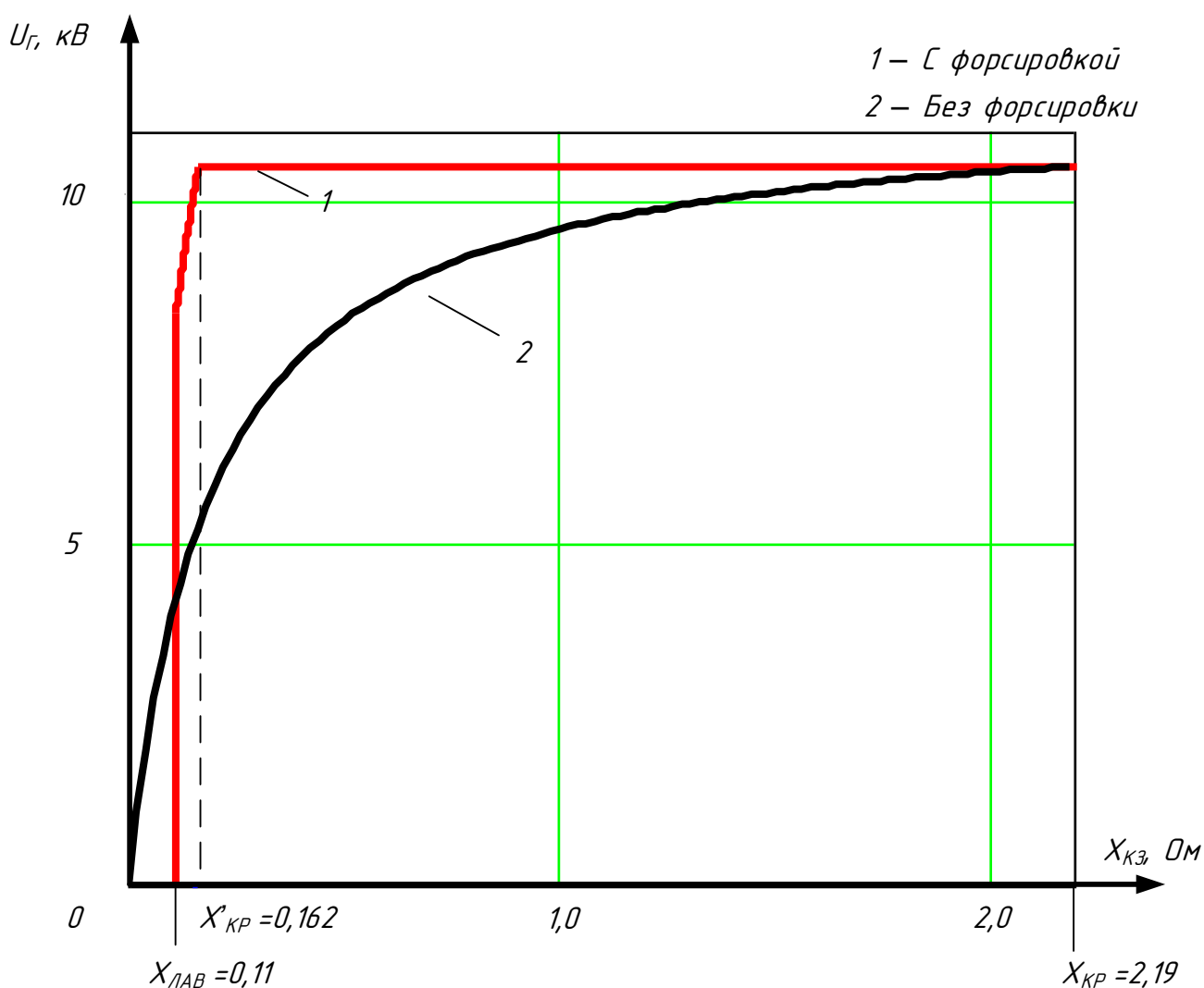


Рисунок 3.8 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФП-63-2М от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{КЗ}=0..2,19$  (Ом)

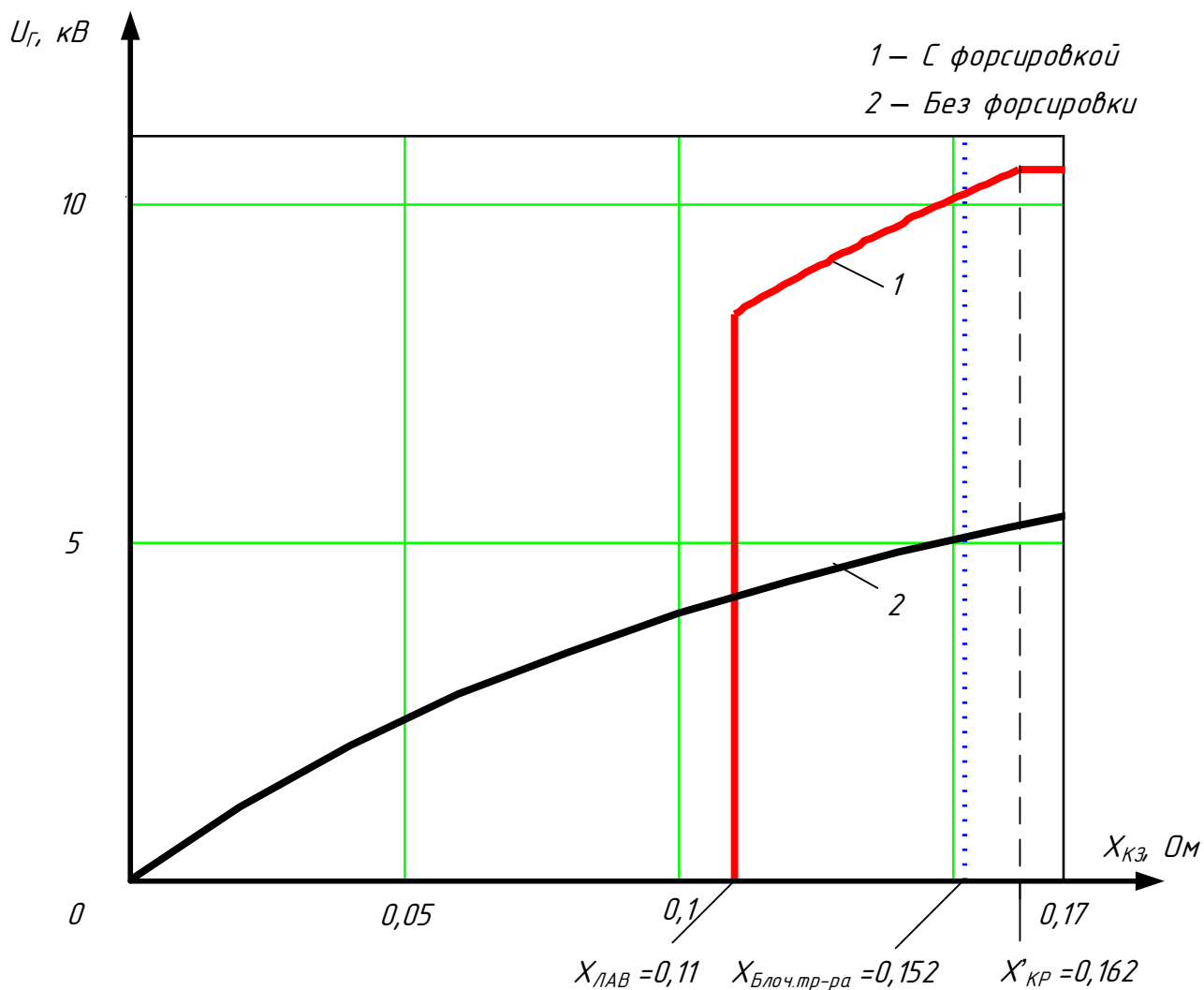


Рисунок 3.9 – Зависимость напряжения на выводах генератора ТЗФП-63-2М от удаленности места КЗ для СТРС при  $X_{кз}=0..0,17$  (Ом)

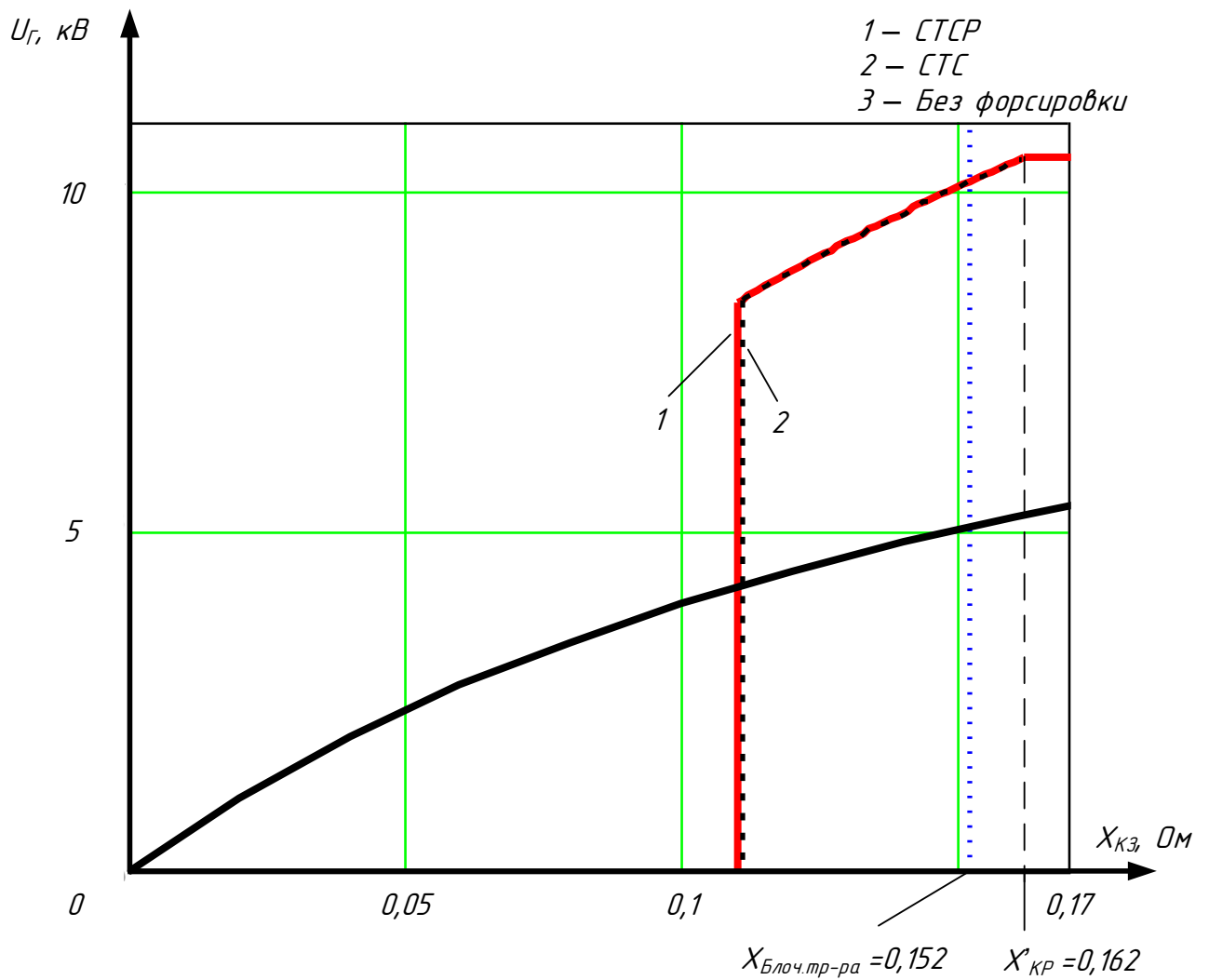


Рисунок 3.10 – Сравнение СТС и СТСП для генератора ТЗФП-63-2М при  $X_{К3}=0..0,17$  (Ом)

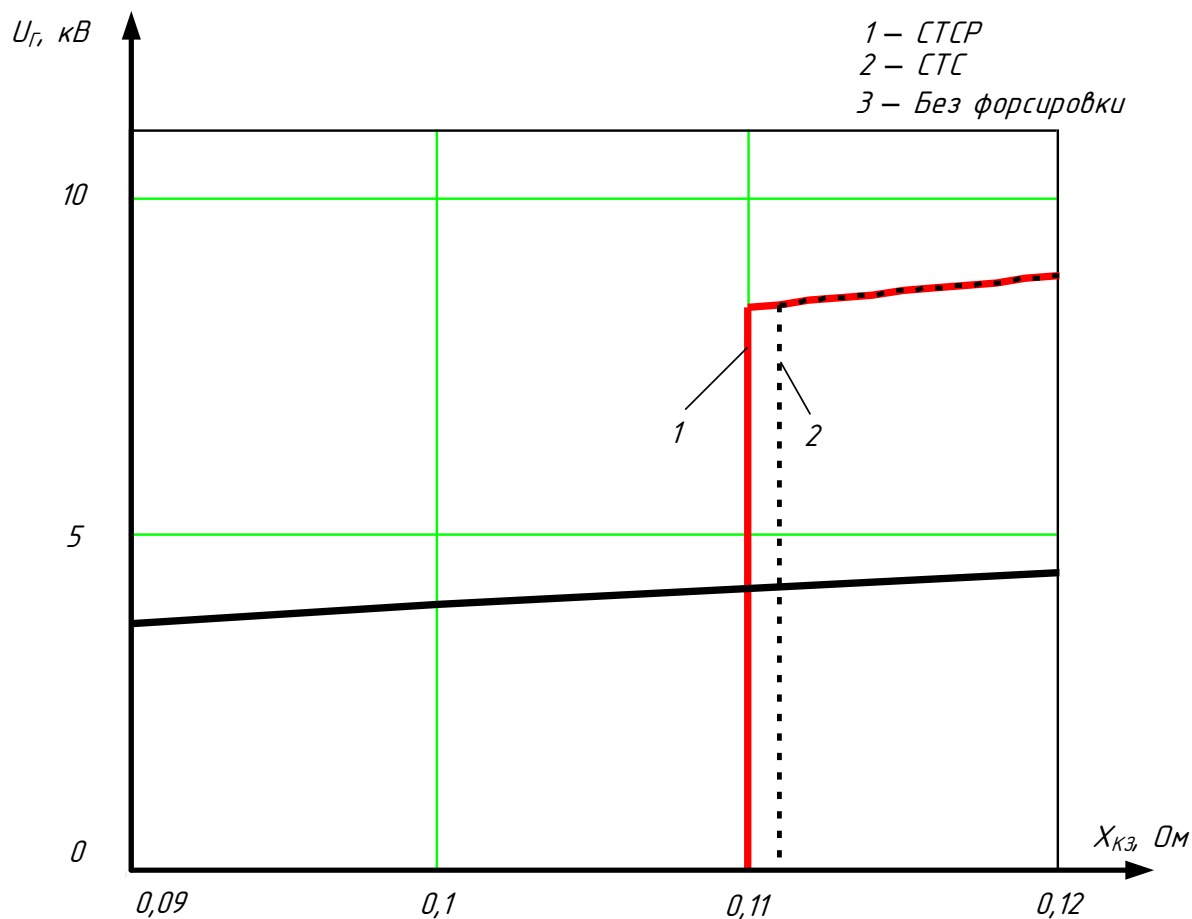


Рисунок 3.11 – Сравнение СТС и СТСР для генератора ТЗФП-63-2М при  $X_{КЗ}=0,09..0,12$  (Ом)

Сравнивая полученные графики на рис.3.8 и 3.9 с графиками по СТС, можно сделать вывод, что при работе генератора с резервной системой возбуждения лавина напряжения может начаться чуть позже, так как  $X_{ЛАВ-СТС} = 0,111$  Ом, а  $X_{ЛАВ-СТСР}=0,11$  Ом. Тем не менее это отличие незначительно, и оно возникает из-за того, что сопротивление  $X_{\gamma}$  в расчете резервной системы меньше, 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. В данном случае лавина существенно не сдвигается как в п.3.1, так как напряжение  $U_d$  рабочей и резервной системы совпадает.



#### 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РАБОЧИХ СИСТЕМ 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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

термической стойкости обмотки ротора и тиристоров, так как подобные расчеты затруднительны и требуют большого количества данных, которые используются в конструкторских бюро, и в свободном доступе их нет. Так как ток существенно возрастет, определим допустимое время такого режима.

#### 4.1 Форсировка трехкратным током на рабочей СТС генератора ТЗФГ-160-2М

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 1745 А;

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

$$t_{\text{доп}} = \frac{(2 \cdot 1745)^2 \cdot 20}{(3 \cdot 1745)^2} = 8,89 \text{ (с)}.$$

Далее определим допустимое время, при котором тиристоры выдержат трехкратный ток возбуждения. В системе самовозбуждения СТСН-2П-270-1900-2,5 устанавливаются тиристоры марки Т283-2500-30-71, параметры которого взяты из каталога завода-изготовителя и приведены в таблице 14.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				101
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 14 – Основные параметры тиристора T283-2500-30-71 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

Максимальная температура перехода из таблицы 9 определяется как:

$$\Theta_{\text{доп}} = \Theta_{\text{охл}} + \Theta_{\text{ном}} + \Delta\Theta_{\text{форс}}; \quad (3.2)$$

где  $\Theta_{\text{доп}} = 125$  °С;

$\Theta_{\text{охл}}$  - температура среды охлаждения тиристора, принимается равной 30 °С;

$\Theta_{\text{ном}}$  - температура тиристора при номинальном токе ротора (1745 А), которая определяется по формуле из [21]:

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

где  $I_{\text{Т.НОМ}}$  - ток тиристора при номинальном токе ротора, равный  $1745/3=582$  А;

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

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

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

$r_{\text{тепл}}^{(\text{длит})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора в длительном режиме при протекании номинального тока, °С/Вт;

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				102
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

$r_{\text{тепл}}^{(\text{форс})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора в кратковременном режиме (форсировка), °С/Вт.

Переходное тепловое сопротивление тиристора 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 11,5 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 3.1 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:

$$X_{\gamma} = \frac{2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,745 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{199,93} = 0,03 \text{ (о.е.)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				103
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Углы в различных режимах работы системы возбуждения:

номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,03 \cdot (3 - 1)}{3} \right] = 69,9^\circ;$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_{\text{Ф}} = \arccos [3 \cdot \cos(69,9)] = 14^\circ;$$

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(15) + 0,03] = 159,4^\circ;$$

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

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03}{\cos(69,9) - 0,5 \cdot 0,03} = -2,9;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\text{ГФ}} = \arccos [-\cos(15) + 3 \cdot 0,03] = 151,1^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\text{ГФ}} = \frac{\cos(151,1) - 0,5 \cdot 3 \cdot 0,03}{\cos(69,9) - 0,5 \cdot 0,03} = -2,8.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				104
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

$$I_{d \text{ ном}}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ном}}^* = \cos(69,9) - 0,5 \cdot 0,03 = 0,33 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d \text{ П}}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ П}}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,03 = 0,99 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d \text{ ф}}^* = 3 \cdot 0,03 = 0,09 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ф}}^* = \cos(14) - 0,5 \cdot 0,09 = 0,99 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d \text{ ГН}}^* = 0,03 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ ГН}}^* = \cos(159,4) - 0,5 \cdot 0,03 = -0,951 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				105
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$I_{d \text{ гф}}^* = 3 \cdot 0,03 = 0,09 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d \text{ гф}}^* = \cos(151,1) - 0,5 \cdot 0,09 = -0,921 \text{ (о.е.).}$$

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

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{188,2}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 6,9 \text{ (кА);}$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 160^2\right)^2 + \left(\frac{15,75^2}{188,2^2} \cdot 99,1^2 + 0,277\right)^2} = 1,48 \text{ (Ом);}$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{\text{НОМ}} = 6,9 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{3} = 17,72 \text{ (кВ).}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				106
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Представим внешние характеристики СТС генератора ТЗФГ-160-2М при трехкратной форсировке на рисунке 4.1.

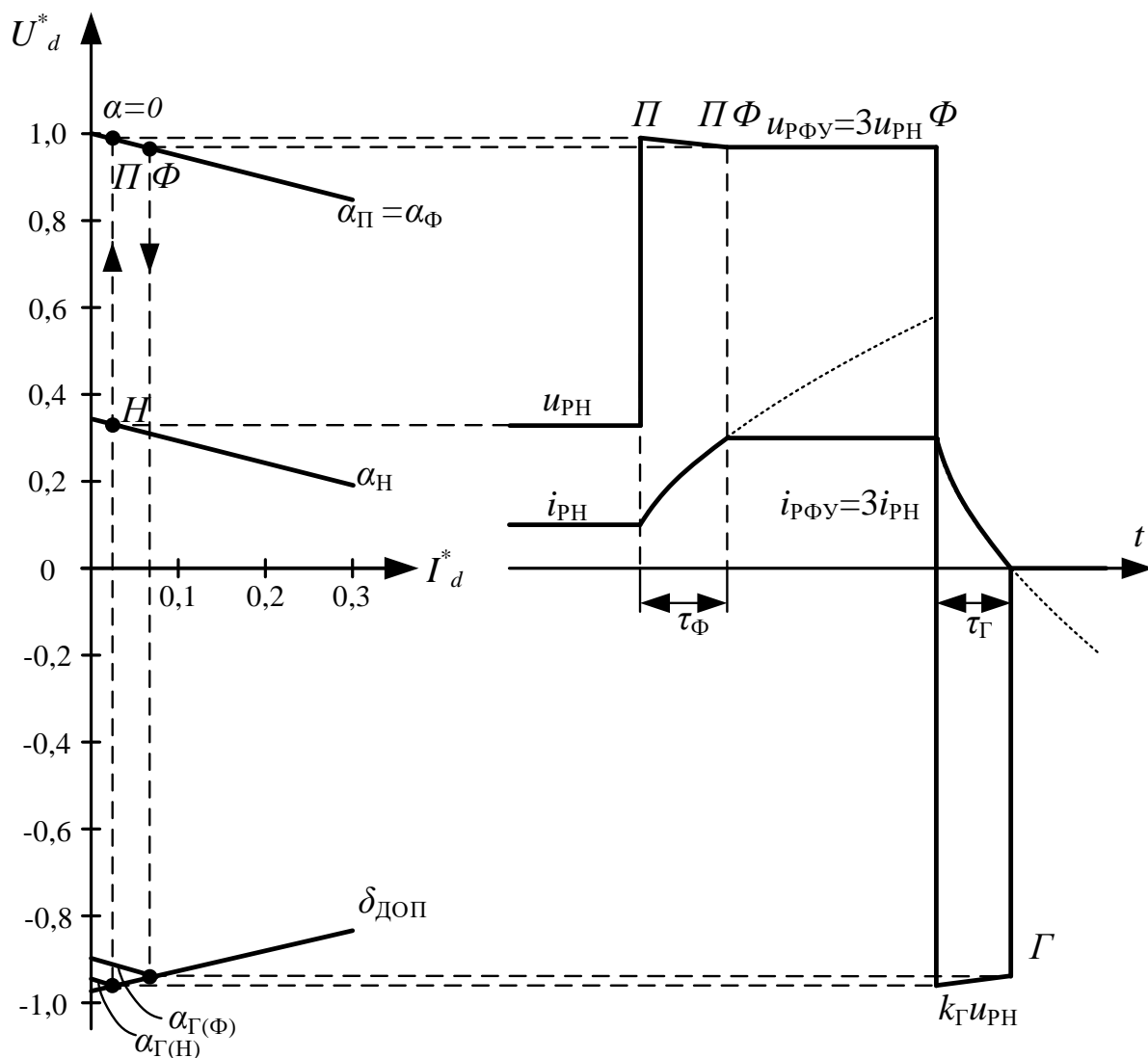


Рисунок 4.1 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТС для ТЗФГ-160-2М при трехкратной форсировке

Рассмотрим КЗ за выводами ВН блочного трансформатора, значения будут такими же, как и на рабочей системе возбуждения при двукратной форсировке, так как предшествующий режим был номинальным, тогда сопротивление от генератора до точки КЗ примем равное:

$$X_{\text{КЗ}} = 0,2 \text{ (Ом)}.$$



Ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась (2.45):

$$I_{\text{кз}} = \frac{17,72}{0,477 \cdot \sqrt{3}} = 21,45 \text{ (кА)};$$

тогда напряжение на выводах генератора будет определяться по (2.46):

$$U'_{\Gamma} = 17,72 - 21,45 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 7,43 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по (2.47):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,277}{\frac{17,72}{15,75} - 1} = 2,22 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{кз}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) 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 4.2 - 4.4.

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 (2.48):

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

где  $K_{\text{T.ТВ}}$  – коэффициент трансформации трансформатора возбуждения (2.49):

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				108
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

Тогда ЭДС тиристорного преобразователя:

$$E_2 = \frac{7\,430}{58,33} = 127,37 \text{ (В)}.$$

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 (2.50):

$$u_d = 2,34 \cdot 127,37 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,745 = 293,73 \text{ (В)}.$$

Далее определим ток обмотки ротора в тот момент, когда установили угол  $\alpha$  равный 0 град.эл. (2.51):

$$i_d = \frac{293,73}{0,147} = 1\,998 \text{ (А)}.$$

Так как ток обмотки ротора увеличился, то увеличится и ЭДС генератора (2.53):

$$E_{Г(1)} = 10,15 \cdot 1\,998 = 20\,281 \text{ (В)}.$$

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

$$I_{КЗ(1)} = \frac{20\,281}{\sqrt{3} \cdot 0,477} = 24\,548 \text{ (А)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				109
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно:

$$U'_{Г(1)} = 20\,281 - 24\,548 \cdot 0,277 \cdot \sqrt{3} = 8\,503 \text{ (В)}.$$

Подобным образом процесс будет циклическим и итерационным, как и в расчетах в п.2.2 и 3.1. Результаты расчета приведены на рисунках ниже. Сравним трехкратную и двукратную форсировку.

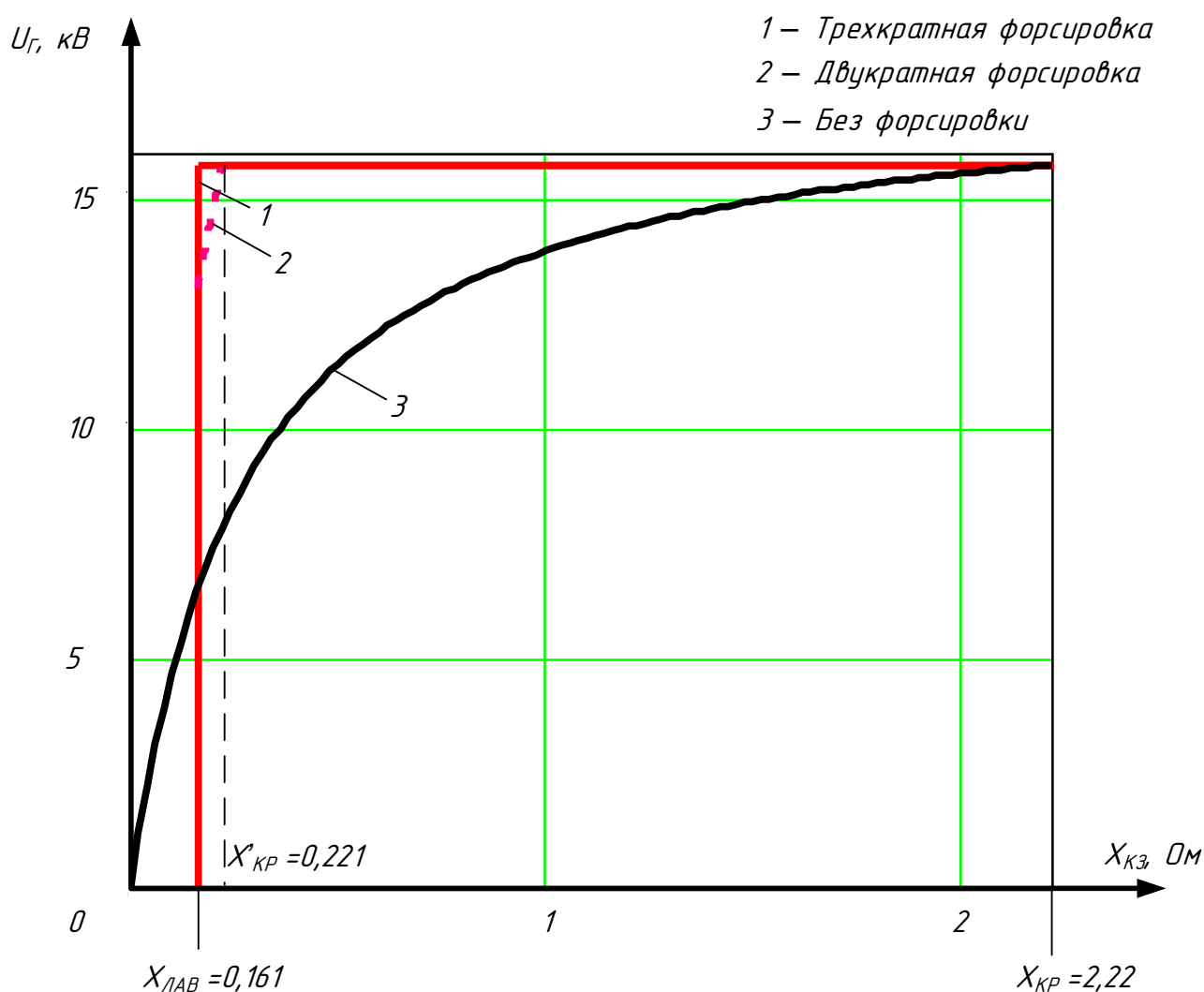


Рисунок 4.2 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФГ-160-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..2,22$  (Ом)

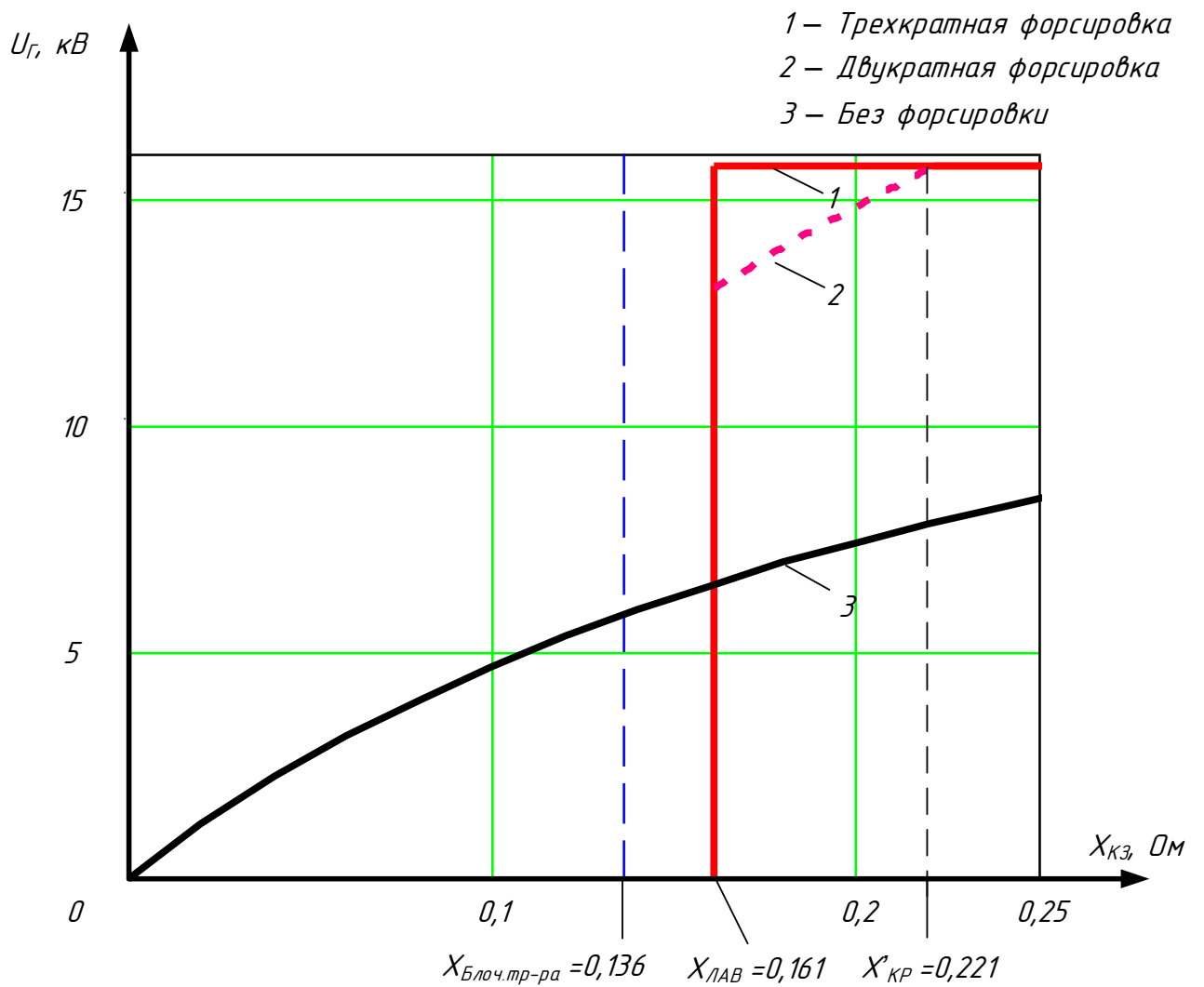


Рисунок 4.3 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФГ-160-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..0,25$  (Ом)

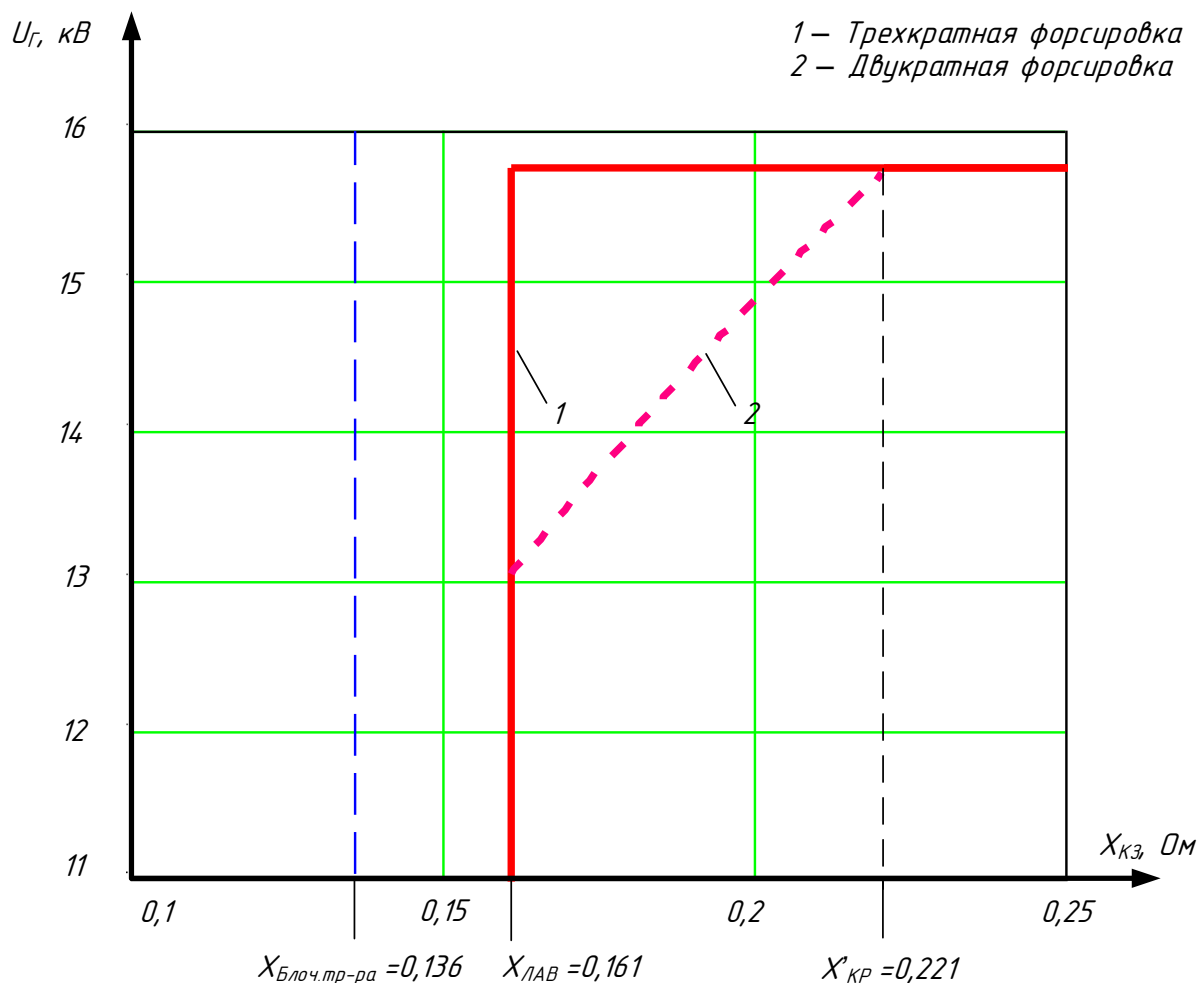


Рисунок 4.4 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФГ-160-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0,1..0,25$  (Ом)

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  $X_{кз}=0,161$  Ом, при котором возникает лавина напряжения, не изменилось.

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  $U_{dном}$  немного большим, чем номинальное напряжение обмотки ротора  $U_{f ном}$ , а также выбирать трансформатор возбуждения с меньшим коэффициентом трансформации  $K_{ТВ}$ , чтобы добиться повышения напряжения на обмотке низкого напряжения  $U_{НН}$ . В результате можно добиться уменьшения  $X_{ЛАВ}$  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.

#### 4.2 Форсировка трехкратным током на рабочей СТС генератора ТЗФП-63-2М

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 по формуле (3.1):

$$t_{доп} = \frac{(2 \cdot 800)^2 \cdot 20}{(3 \cdot 800)^2} = 8,89 \text{ (с)}.$$

Далее определим допустимое время, при котором тиристоры выдержат трехкратный ток возбуждения. В системе самовозбуждения

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				113
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СТСН-2П-350-1000-2,5 устанавливаются тиристоры марки T173-1600-36-T1E2, параметры которого взяты из каталога завода-изготовителя и приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Основные параметры тиристора T173-1600-36-T1E2 согласно [5]

Параметр	Значение
Максимальная температура перехода, °С	125
Пороговое напряжение при $t=125$ °С, В	1,15
Динамическое сопротивление при $t=125$ °С, мОм	0,22
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при $t=85$ °С, А	2 070

Максимальная температура перехода из таблицы 9 определяется по (3.2):

$$\Theta_{\text{доп}} = \Theta_{\text{охл}} + \Theta_{\text{ном}} + \Delta\Theta_{\text{форс}};$$

где  $\Theta_{\text{доп}} = 125$  °С;

$\Theta_{\text{охл}}$  - температура среды охлаждения тиристора, принимается равной 30 °С;

$\Theta_{\text{ном}}$  - температура тиристора при номинальном токе ротора (800 А), которая определяется по формуле (3.3):

$$\Theta_{\text{ном}} = r_{\text{тепл}}^{(\text{длит})} \cdot (I_{\text{т.ном}} \cdot U_{\text{т.0}} + K_{\text{ф}}^2 \cdot I_{\text{т.ном}}^2 \cdot r_{\text{т}});$$

где  $I_{\text{т.ном}}$  - ток тиристора при номинальном токе ротора, равный  $800/3=267$  А;

$U_{\text{т.0}}$  - пороговое напряжение тиристора из таблицы 9, равное 1,15 В;

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

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				114
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$r_T$  - динамическое сопротивление тиристора из таблицы 9, равное 0,22 мОм;

$r_{\text{тепл}}^{(\text{длит})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора в длительном режиме при протекании номинального тока, °С/Вт;

$\Delta\Theta_{\text{ФОРС}}$  - температура тиристора при форсировке, определяется по формуле (3.4):

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

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

$r_{\text{тепл}}^{(\text{форс})}$  - переходное тепловое сопротивление тиристора в кратковременном режиме (форсировка), °С/Вт.

Переходное тепловое сопротивление тиристора 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 12 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 2.4 и 3.2 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:

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				115
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$X_{\gamma(350)} = 7,35 \cdot 10^{-3} + 2,12 \cdot 10^{-4} = 7,56 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

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

фазное напряжение выпрямителя по формуле (2.40):

$$U_{2\phi} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot 350 + \frac{3}{\pi} \cdot 7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 143,85 \text{ (В)};$$

ЭДС преобразователя по формуле (2.41):

$$E_{2л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 350}{\frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}} = 259,17 \text{ (В)};$$

ток двухфазного КЗ в преобразователе по формуле (2.42):

$$I_{2km} = \frac{\sqrt{6} \cdot 143,85}{2 \cdot 7,56 \cdot 10^{-3}} = 23,3 \text{ (кА)};$$

ток в обмотке возбуждения в относительных единицах по формуле (2.43):

$$I_d^* = \frac{800}{23\ 300} = 0,043 \text{ (о.е.)};$$

сопротивление  $X_{\gamma}$  в относительных единицах по формуле (2.44):

$$X_{\gamma} = \frac{7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{259,17} = 0,036 \text{ (о.е.)};$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				116
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Определяются углы в различных режимах работы системы возбуждения:  
номинальный режим по формуле (2.1):

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \arccos \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot 0,036 \cdot (3 - 1)}{3} \right] = 69,8^\circ,$$

режим форсировки из номинального по формуле (2.2):

$$\alpha_{\text{Ф}} = \arccos [3 \cdot \cos(69,8)] = 15,3^\circ;$$

режим гашения поля из номинального по формуле (2.3):

$$\alpha_{\text{ГН}} = \arccos [-\cos(15) + 0,036] = 158,5^\circ;$$

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

$$K_{\text{ГН}} = \frac{\cos(158,5) - 0,5 \cdot 0,036}{\cos(69,8) - 0,5 \cdot 0,036} = -2,9;$$

режим гашения поля из форсировки по формуле (2.5):

$$\alpha_{\text{ГФ}} = \arccos [-\cos(15) + 3 \cdot 0,036] = 149,2^\circ;$$

коэффициент гашения поля из форсировки по формуле (2.6):

$$K_{\text{ГФ}} = \frac{\cos(149,2) - 0,5 \cdot 3 \cdot 0,036}{\cos(69,8) - 0,5 \cdot 0,036} = -2,79.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				117
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

$$I_{d_{\text{НОМ}}}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d_{\text{НОМ}}}^* = \cos(69,8) - 0,5 \cdot 0,036 = 0,327 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d_{\text{П}}}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d_{\text{П}}}^* = 1 - 0,5 \cdot 0,036 = 0,982 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d_{\text{Ф}}}^* = 3 \cdot 0,036 = 0,108 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d_{\text{Ф}}}^* = \cos(15,3) - 0,5 \cdot 0,108 = 0,982 \text{ (о.е.);}$$

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

$$I_{d_{\text{ГН}}}^* = 0,036 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{d_{\text{ГН}}}^* = \cos(158,5) - 0,5 \cdot 0,036 = -0,948 \text{ (о.е.);}$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				118
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$I_{dгф}^* = 3 \cdot 0,036 = 0,108 \text{ (о.е.);}$$

$$U_{dгф}^* = \cos(149,2) - 0,5 \cdot 0,108 = -0,912 \text{ (о.е.).}$$

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

$$I_{НОМ} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,33 \text{ (кА);}$$

полное сопротивление генератора по формуле (2.18):

$$Z = \sqrt{\left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 63^2\right)^2 + \left(\frac{10,5^2}{78,75^2} \cdot 47,25^2 + 0,19\right)^2} = 1,52 \text{ (Ом);}$$

номинальная ЭДС генератора по формуле (2.20):

$$E_{НОМ} = 4,33 \cdot 1,522 \cdot \sqrt{3} = 11,41 \text{ (кВ).}$$

Представим внешние характеристики СТС генератора ТЗФП-63-2М на рисунке 4.5.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				119
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

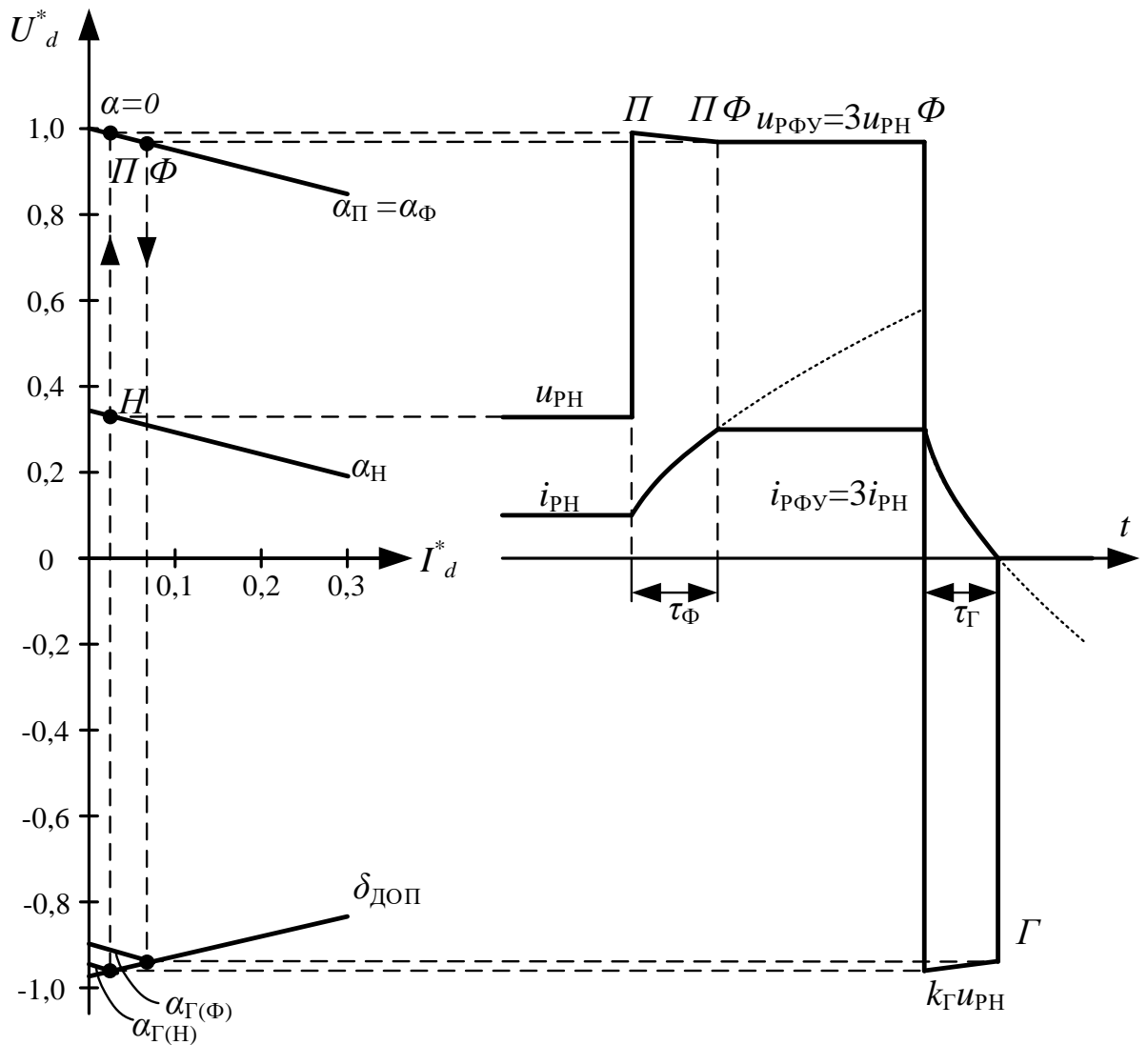


Рисунок 4.5 – Взаимосвязь параметров режима элементов контура регулирования СТС для генератора ТЗФП-63-2М при трехкратной форсировке

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

$$X_{\text{КЗ}} = 0,152 \text{ (Ом)};$$

$$Z_{\text{КЗ}} = 0,152 + 0,19 = 0,342 \text{ (Ом)};$$

ток трехфазного КЗ в начальный момент, когда форсировка еще не началась по формуле (2.45):

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{11,41}{0,342 \cdot \sqrt{3}} = 19,26 \text{ (кА)};$$

тогда напряжение на выводах генератора будет определяться по формуле (2.46):

$$U'_{\Gamma} = 11,41 - 19,26 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 5,07 \text{ (кВ)};$$

критическое сопротивление, при котором система возбуждения в состоянии поддерживать номинальное напряжение на выводах генератора без форсировки, определяется по формуле (2.47):

$$X'_{\text{кр}} = \frac{0,19}{\frac{11,41}{10,5} - 1} = 2,19 \text{ (Ом)}.$$

Изменяя  $X_{\text{КЗ}}$ , можно определить значение напряжения на выводах генератора при различных удаленностях места КЗ. По формуле (2.46) 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 4.6 – 4.8.

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 формуле (2.48):

$$E_2 = \frac{5\ 070}{30} = 169 \text{ (В)}.$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				121
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Коэффициент трансформации трансформатора возбуждения по формуле (2.49):

$$K_{Т.ТВ} = \frac{10,5}{0,35} = 30.$$

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, по формуле (2.50):

$$u_d = 2,34 \cdot 169 \cdot 1 - \frac{3}{\pi} \cdot 7,56 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 389,68(\text{В}).$$

Омическое сопротивление обмотки ротора, Ом, определяется по формуле (2.52):

$$R_{\text{обм.рот.}} = \frac{325 - 3}{800} = 0,403 (\text{Ом});$$

тогда ток обмотки ротора будет равен по формуле (2.51):

$$i_d = \frac{389,68}{0,403} = 966,95 (\text{А}).$$

Коэффициент, учитывающий зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения. Он определяется по формуле (2.54):

$$K_f = \frac{11\,410}{800} = 14,27 \left(\frac{\text{В}}{\text{А}}\right).$$

Тогда новое значение ЭДС генератора будет равно по формуле (2.53):

$$E_{Г(1)} = 14,27 \cdot 966,95 = 13\,796 (\text{В}).$$

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				122
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Увеличение ЭДС генератора приводит к увеличению напряжения на его выводах, но в то же время возрастет ток трехфазного КЗ. Ток трехфазного короткого замыкания при новом значении ЭДС генератора:

$$I_{\text{кз}(1)} = \frac{13\,796}{\sqrt{3} \cdot 0,342} = 23\,291 \text{ (А)}.$$

Тогда напряжение на выводах статорной обмотки будет равно:

$$U'_{\Gamma(1)} = 13\,796 - 23\,291 \cdot 0,19 \cdot \sqrt{3} = 6\,131 \text{ (В)}.$$

Подобным образом процесс будет циклическим и итерационным, как и в расчетах в п.2.4 и 3.2. Результаты расчета приведены на рисунках ниже. Сравним трехкратную и двукратную форсировку.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				123
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



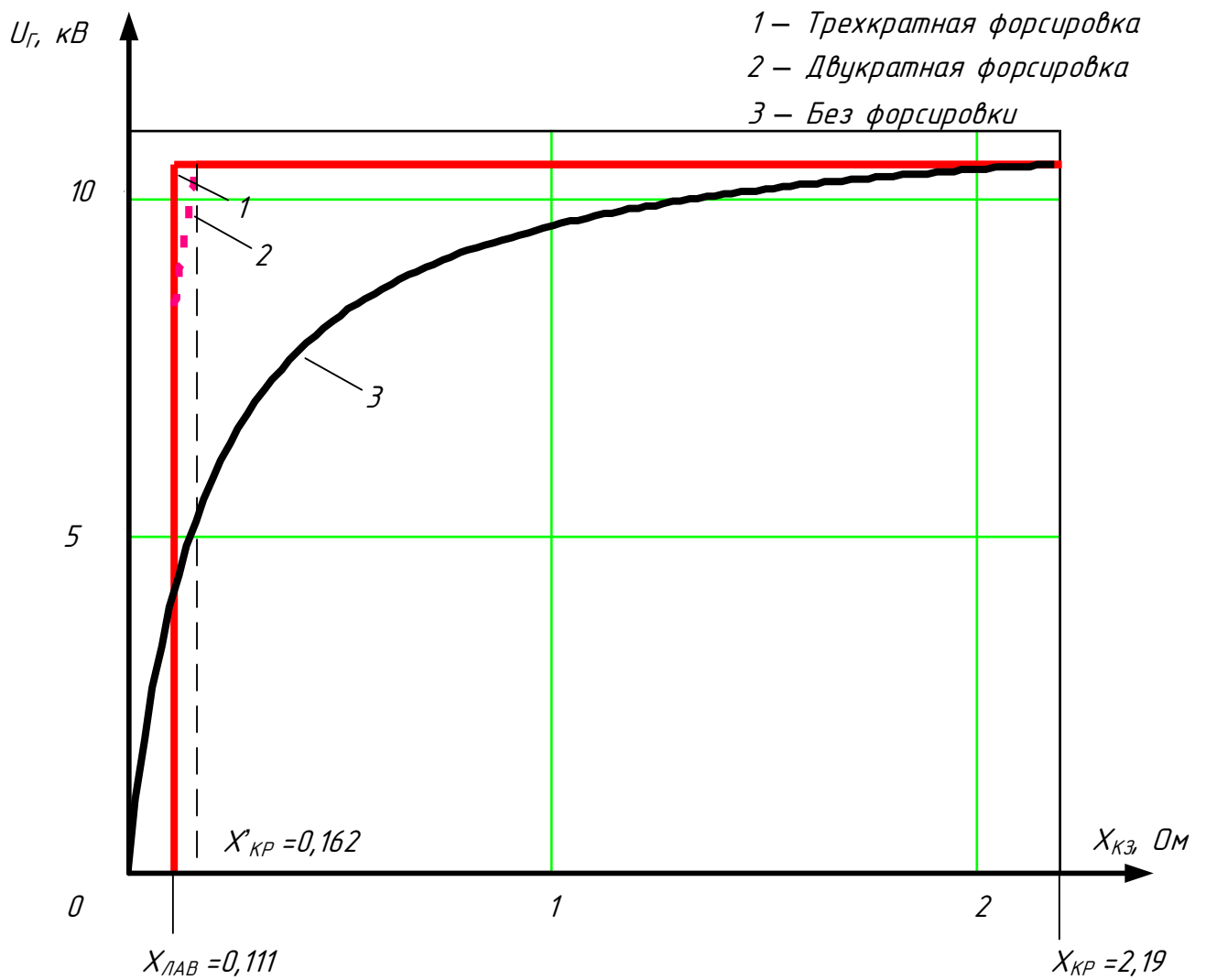


Рисунок 4.6 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФП-63-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..2,19$  (Ом)

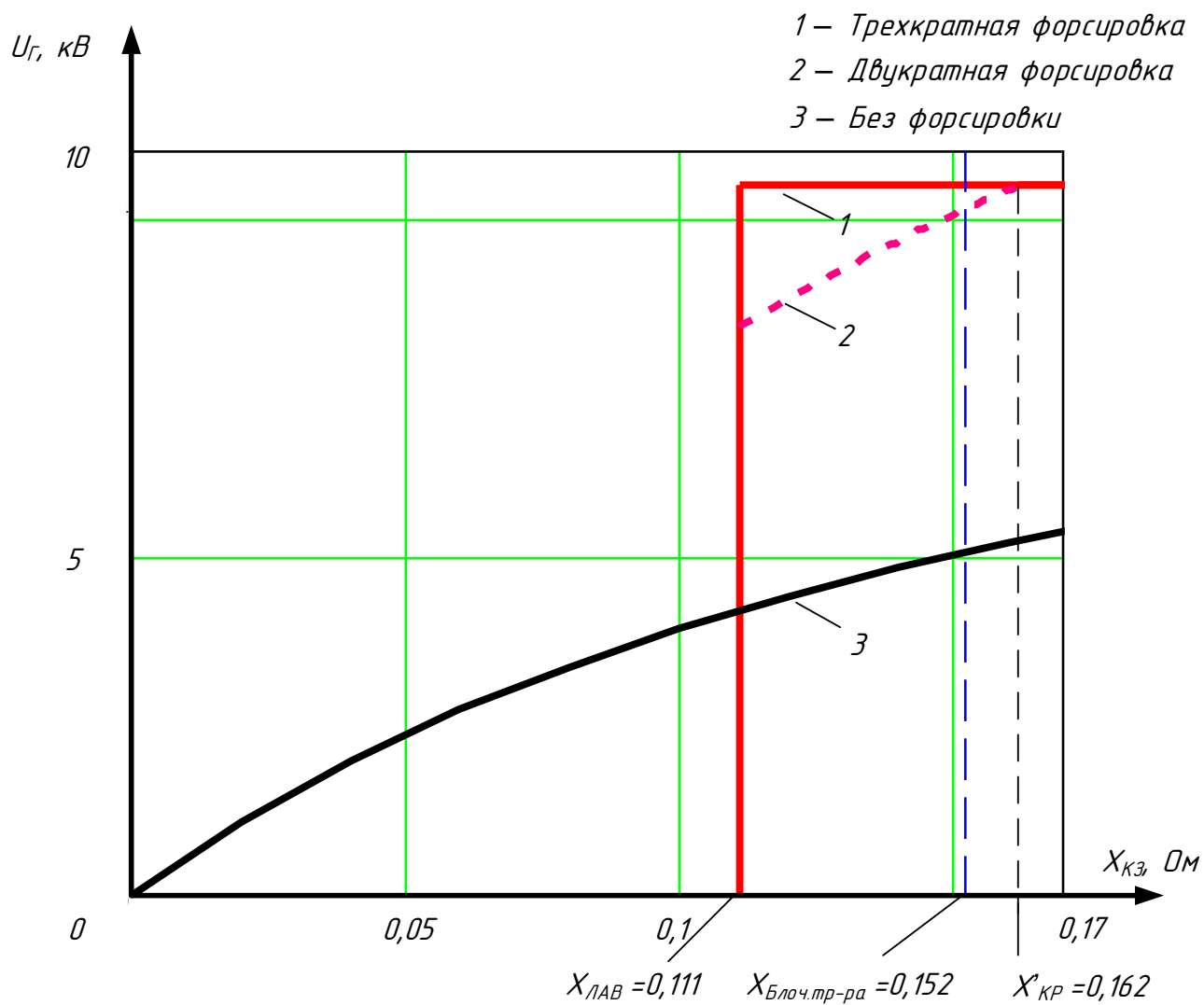


Рисунок 4.7 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФП-63-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0..0,17$  (Ом)

		Поснов А.А.		
		Гольдштейн М.Е.		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.2017.00035.ВКР

Лист

125

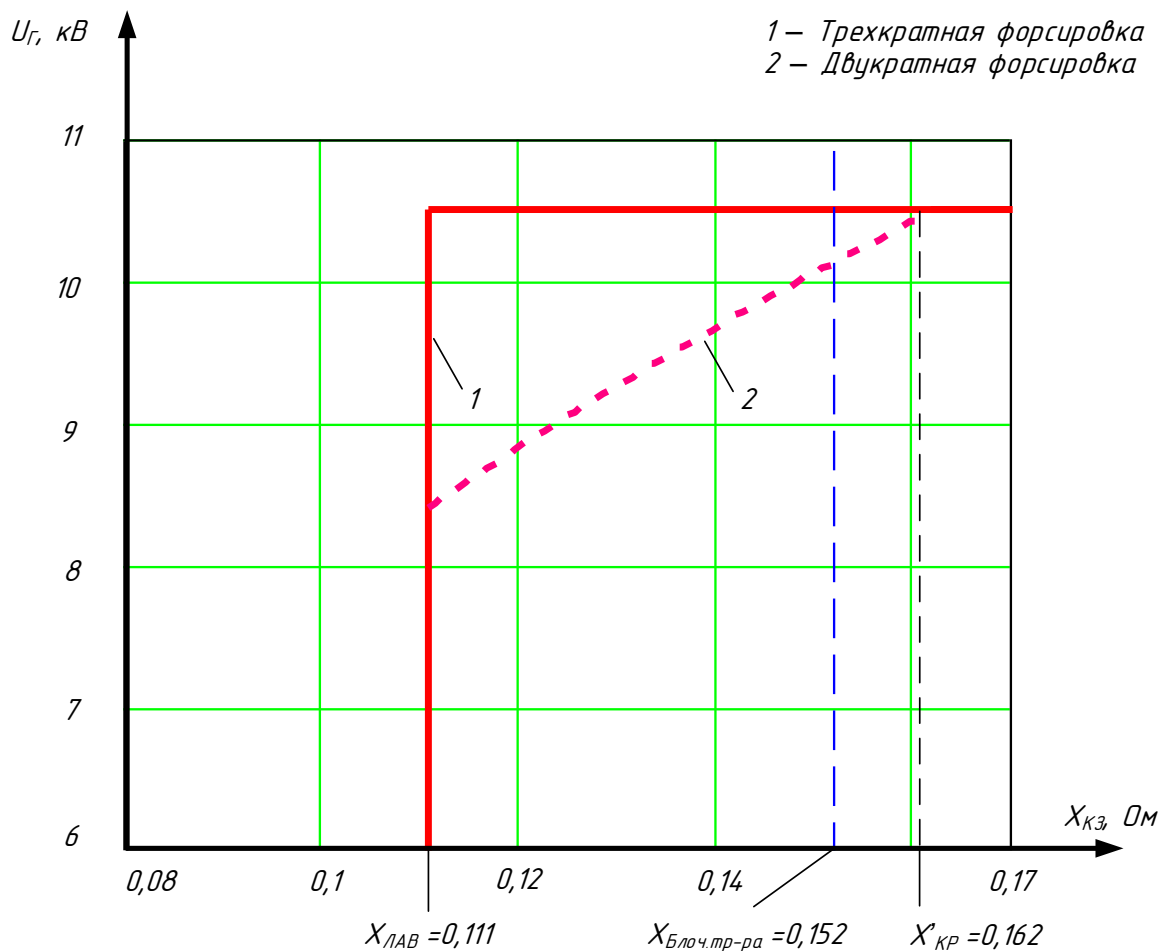


Рисунок 4.8 – Сравнение зависимости напряжения для СТС ТЗФП-63-2М с трехкратной и двукратной форсировкой при  $X_{кз}=0,08..0,17$  (Ом)

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 четвертой главы, выполнены. Однако, сопротивление  $X_{кз}=0,111$  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  $X_{Лав}$  не имеет смысла, и дополнительных мер принимать не нужно.

## 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: СТСН-2П-270-1900-2,5 – рабочая для генератора ТЗФГ-160-2М, СТСН-2П-350-1000-2,5 – рабочая для генератора ТЗФП-63-2М и СТСП-1Е-350-2050-2 – 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 генераторов 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.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				127
Изм.	Лист	№ докум.	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.

		<i>Поснов А.А.</i>			<i>13.04.02.2017.00035.ВКР</i>	<i>Лист</i>
		<i>Гольдштейн М.Е.</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>128</b>

- 10 Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Стереотипное переиздание. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2008. – 704 с.
- 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 СТСН-2П-270-1900-2,5
- 18 Техническое описание системы тиристорной самовозбуждения СТСН-2П-350-1000-2,5
- 19 Техническое описание системы тиристорной самовозбуждения резервной СТСП-1Е-350-2050-2
- 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.

		Поснов А.А.			13.04.02.2017.00035.ВКР	Лист
		Гольдштейн М.Е.				129
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		