

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИК
УПРАВЛЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ИЛИ
НАХОДЯЩИМИСЯ В ОСТРОВНОМ РЕЖИМЕ
РАБОТЫ ЭНЕРГОРАЙОНАМИ С
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ
ЭНЕРГИИ**

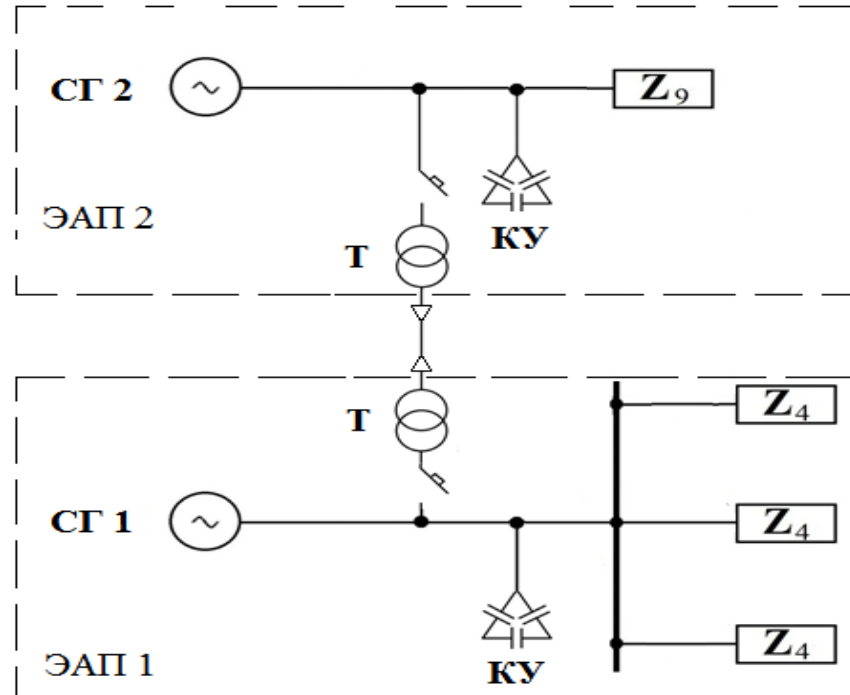
Докладчик: Косарев Б.А., к.т.н., доц. ОмГТУ

Содержание доклада:

1. Компьютерное моделирование изолированной или находящейся в островном режиме работы системы электроснабжения с распределенными источниками энергии.
2. Методика управления изолированной или находящейся в островном режиме работы системы электроснабжения с распределенными источниками энергии.
3. Методика снижения потерь мощности при электропередаче в изолированной системе электроснабжения с распределенными источниками энергии.
4. Феррорезонансные процессы в системах электроснабжения с распределенными источниками энергии.
5. Перетоки мощности в системе электроснабжения энергорайона с объектом распределенной генерации на основе ВИЭ.
6. Основные выводы по докладу, перспективы использования результатов исследований, планы исследований и необходимые ресурсы.

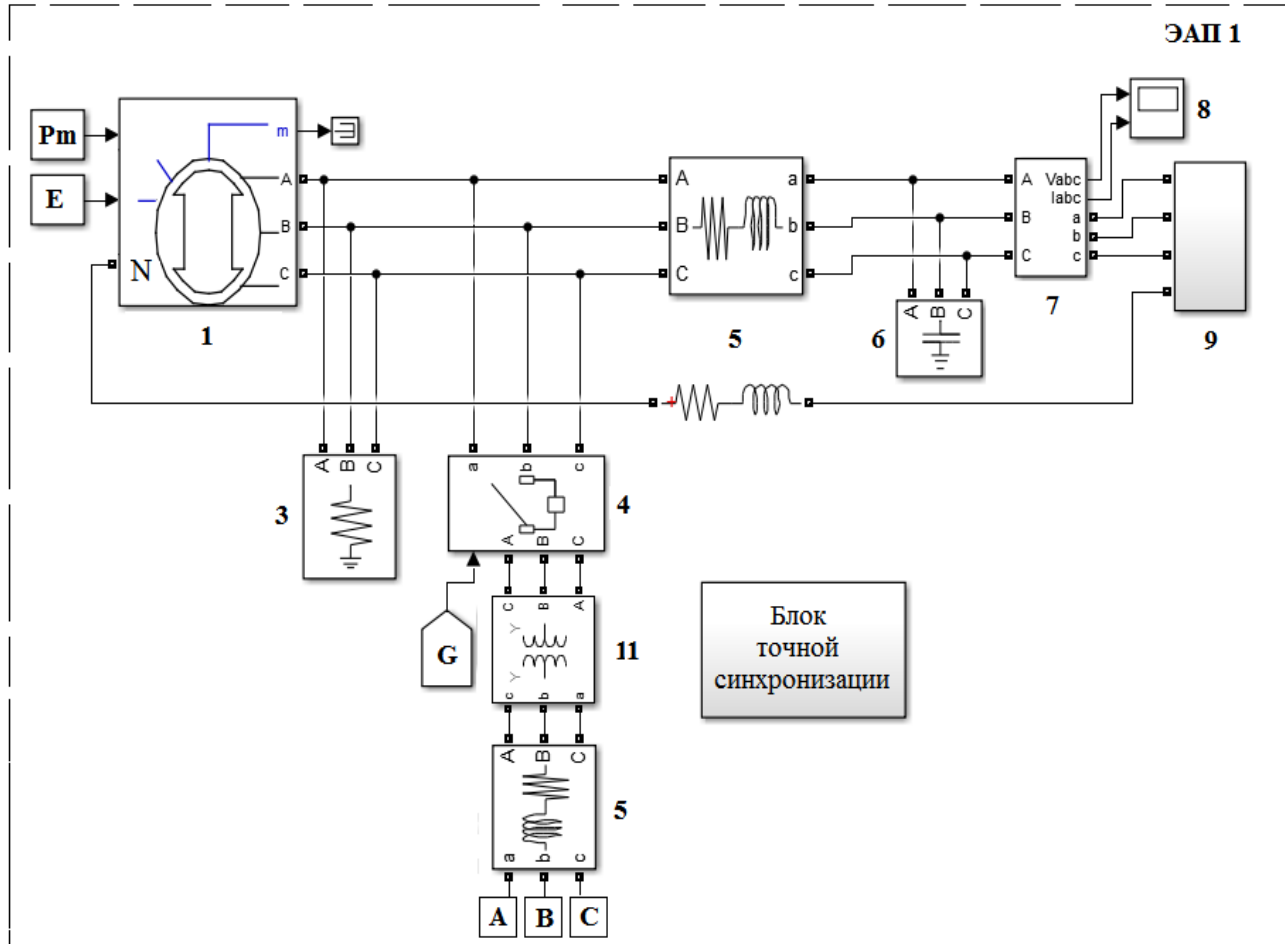
Компьютерная модель изолированного или находящегося в островном режиме работы энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой

Выбор схемы энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой и расчет параметров её элементов

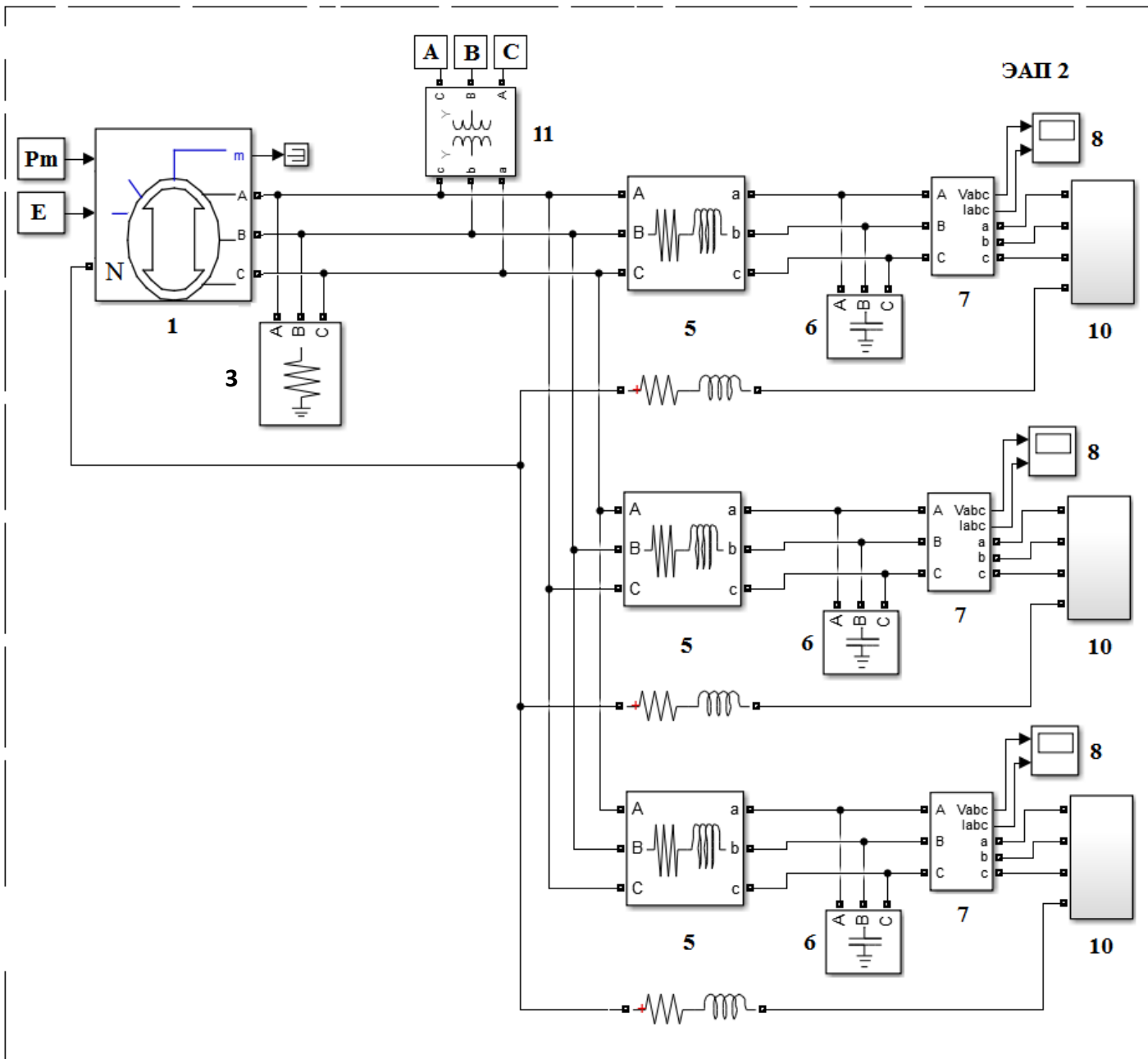


Принципиальная схема энергорайона: СГ1, СГ2 – синхронные генераторы; Т – силовой трансформатор 6/0,4 кВ; КУ – компенсирующие устройства; Z₉ – блок нагрузки 9 жилых зданий; Z₄ – блок нагрузки 4 жилых зданий; ЭАП – электросистема активного потребителя

S-модель изолированного или находящегося в островном режиме работы энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой



Структурная схема s-модели энергорайона: 1, 2 - синхронные генераторы; 3 - активная нагрузка (собственные нужды генератора); 4 - управляемый выключатель; 5 - трехфазная линия электропередачи, 6 - компенсирующее устройство; 7 - блок измерения напряжения и тока; 8 - осциллограф; 9 - блок нагрузки 9 жилых зданий; 10 - блок нагрузки 4 жилых зданий; ЭАП - электросистема активного потребителя; 11 – силовой трансформатор 6/0,4 кВ



В качестве генерирующих установок системы выбраны синхронные генераторы (блоки 1,2 Synchronous Machine), параметры которых представлены в таблице и удовлетворяют условию:

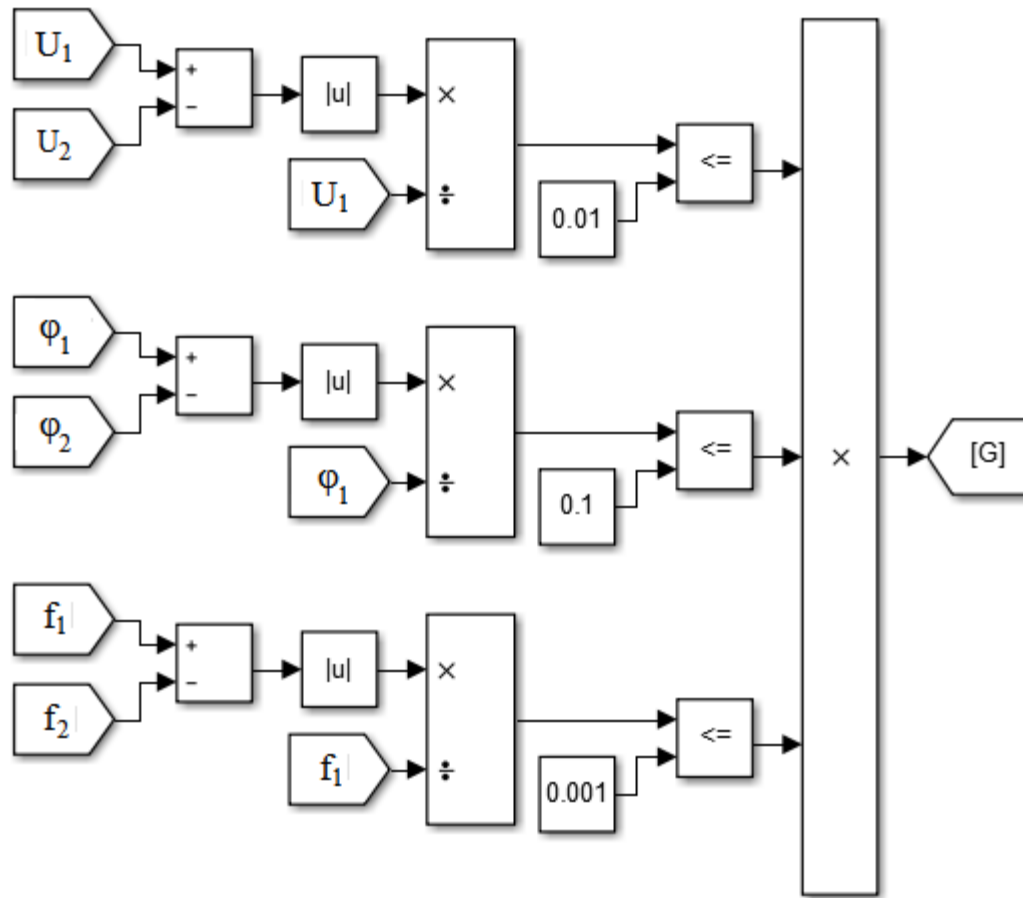
$$P_n \geq \frac{U_n^2}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}},$$

где P_n – номинальная полная мощность, U_n - действующее линейное напряжение, R – активное сопротивление статора, L – индуктивность реакции и рассеяния якоря, f – частота.

Таблица 1. Параметры синхронных генераторов компьютерной модели

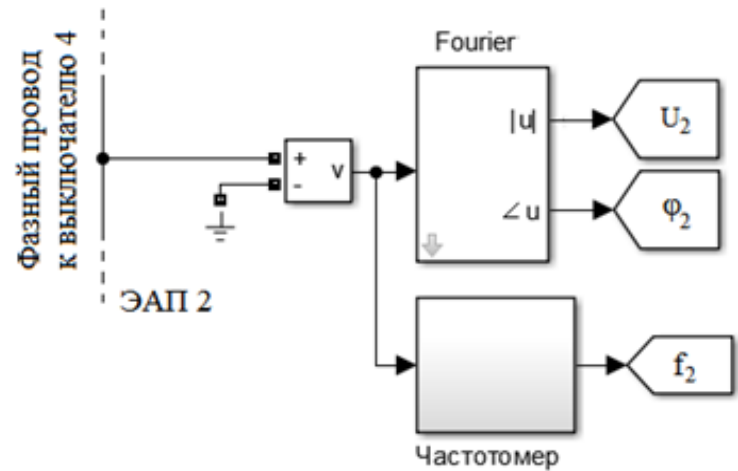
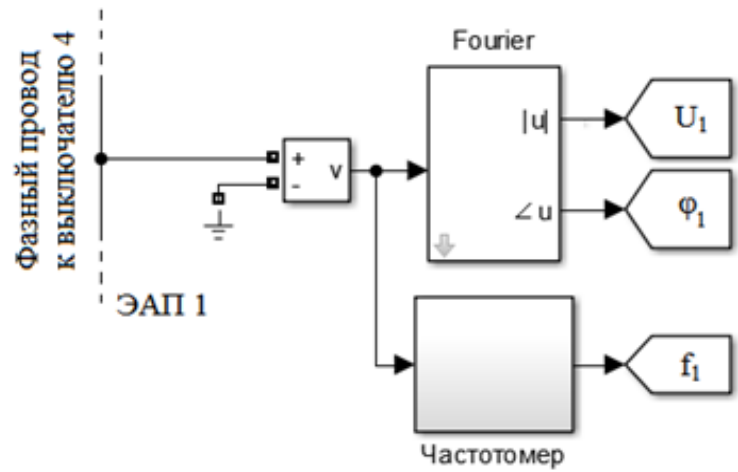
Параметры s-модели	Генератор 1	Генератор 2
Номинальная мощность, кВА	250	75
Номинальное напряжение, кВ	0,4	0,4
Номинальная частота, Гц	50	50
Момент инерции, кг·м ²	4	1
Инерционная постоянная, с	0,197	0,164
Демпфирующий коэффициент	6,77	6,51
Активное сопротивление статора, Ом	0,0051	0,032
Индуктивность, Гн	0,0028	0,0085
Механическая мощность, Вт	181033	60720
Амплитуда ЭДС, В	565,38	569,479

Значения механической мощности первичного двигателя P_m и амплитуды ЭДС E найдены при помощи опции блока Powergui Machine Initialization.



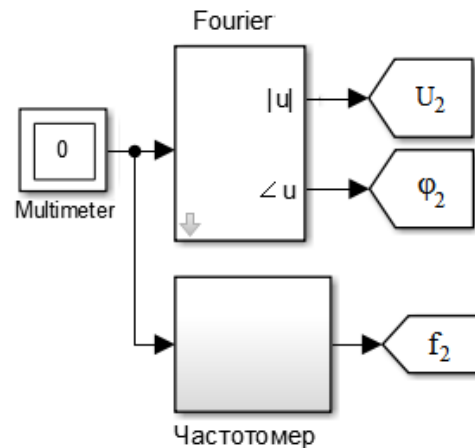
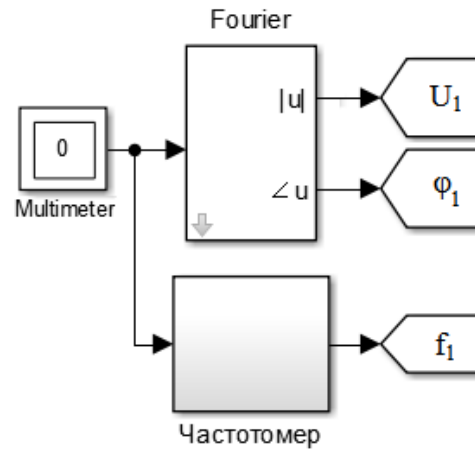
Структурная схема блока точной синхронизации:

U_1 и U_2 , φ_1 и φ_2 , f_1 и f_2 – амплитуды, фазы и частоты напряжений в точке подключений электросистем; $|u|$ - блок, возвращающий абсолютную величину входного сигнала; G – сигнал выполнения условий точной синхронизации



Измерение амплитуды, фазы, частоты напряжения при помощи вольтметра:

Fourier - блок, возвращающий значения амплитуды и фазы сигнала; U_1 и U_2 , ϕ_1 и ϕ_2 , f_1 и f_2 - амплитуды, фазы и частоты напряжений в точке подключений электросистем



Измерение амплитуды, фазы, частоты напряжения при помощи мультиметра:
 Fourier - блок, возвращающий значения амплитуды и фазы сигнала; U_1 и U_2 , φ_1 и φ_2 , f_1 и f_2 – амплитуды, фазы и частоты напряжений в точке подключений электросистем

Оценка токовой нагрузки проводов ЛЭП выполнена по формуле:

$$I_{\phi} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{л}},$$

где I_{ϕ} – фазный ток, S – полная мощность силового трансформатора, $U_{л}$ – линейное напряжение.

Значения активного и реактивного сопротивлений проводов ЛЭП рассчитываются по формулам:

$$R = R_{уд} \cdot L,$$

$$X = X_{уд} \cdot L,$$

где $R_{уд}$, $X_{уд}$ – удельные активные и реактивные сопротивления проводов ЛЭП соответственно, L – длина ЛЭП.

Для части системы со стороны высокого напряжения выбрана марка провода СИП-3 1×16 с $R_{уд} = 1,91$ Ом, $X_{уд} = 0,299$ Ом, допустимая токовая нагрузка 100 А. Для части системы со стороны низкого напряжения выбрана марка провода СИП-2 1×50 с $R_{уд} = 0,822$ Ом, $X_{уд} = 0,0794$ Ом, допустимая токовая нагрузка 195 А.

В модели используется **установка поперечной емкостной компенсации** (блок Three-Phase Series RLC Load) мощностью 21 кВар. Расчет величины реактивной мощности УПЕК выполнен исходя из значений действующего (0,83) и заданного коэффициентов мощности (0,95) .

Таблица 2. Расчетные значения параметров трансформатора ТМ-63

Расчетные параметры	Формулы для расчета	Результаты расчета
Номинальная мощность фазы трансформатора, ВА	$S_{нф} = \frac{S_n}{3}$	21000
Номинальное фазное напряжение первичной обмотки, В	$U_{1нф} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}}$	3464
Номинальный фазный ток первичной обмотки, А	$I_{1нф} = \frac{S_{нф}}{U_{1нф}}$	6,06
Фазный ток холостого хода, А	$I_{ф.х.х} = \frac{I_{1нф} \cdot I_{х.х}}{100}$	0,15
Полное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$Z_{х.х} = \frac{U_{1нф}}{I_{ф.х.х}}$	22860
Мощность потерь холостого хода на фазу, Вт	$P_{ф.х.х} = \frac{P_{х.х}}{3}$	66,67
Коэффициент мощности холостого хода	$\cos \varphi_{х.х} = \frac{P_{ф.х.х}}{U_{1нф} \cdot I_{ф.х.х}}$	0,13

Продолжение таблицы 2. Расчетные значения параметров трансформатора ТМ-63

Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$R_M = Z_{x.x} \cdot \cos \varphi_{x.x}$	2902
Реактивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$X_M = Z_{x.x} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{x.x}}$	22670
Фазное напряжение короткого замыкания, В	$I_{\phi.k.3} = \frac{U_{1нф} \cdot U_{к.3}}{100}$	155,89
Полное сопротивление короткого замыкания, Ом	$Z_{к.3} = \frac{U_{\phi.k.3}}{I_{1нф}}$	25,71
Мощность потерь короткого замыкания на фазу, Вт	$P_{\phi.k.3} = \frac{P_{к.3}}{3}$	433,33
Коэффициент мощности короткого замыкания	$\cos \varphi_{к.3} = \frac{P_{\phi.k.3}}{U_{\phi.k.3} \cdot I_{1нф}}$	0,46
Активное сопротивление короткого замыкания, Ом	$R_{к.3} = Z_{к.3} \cdot \cos \varphi_{к.3}$	11,79
Реактивное сопротивление короткого замыкания, Ом	$X_{к.3} = Z_{к.3} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{к.3}}$	22,85

Окончание таблицы 2. Расчетные значения параметров трансформатора ТМ-63

Расчет параметров в относительных единицах (о.е.)		
Базисное сопротивление, Ом	$Z_{\bar{\sigma}} = \frac{U_{1нф}}{I_{1нф}}$	571,43
Активное сопротивление ветви намагничивания, о.е.	$R_{M(o.e)} = \frac{R_M}{Z_{\bar{\sigma}}}$	5,08
Реактивное сопротивление ветви намагничивания, о.е.	$X_{M(o.e)} = \frac{X_M}{Z_{\bar{\sigma}}}$	39,68
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток, о.е.	$R_{1(o.e)} = R_{2(o.e)} = \frac{R_{к.з}}{2 \cdot Z_{\bar{\sigma}}}$	0,01
Индуктивное сопротивление первичной и вторичной обмоток, о.е.	$X_{1(o.e)} = X_{2(o.e)} = \frac{X_{к.з}}{2 \cdot Z_{\bar{\sigma}}}$	0,02

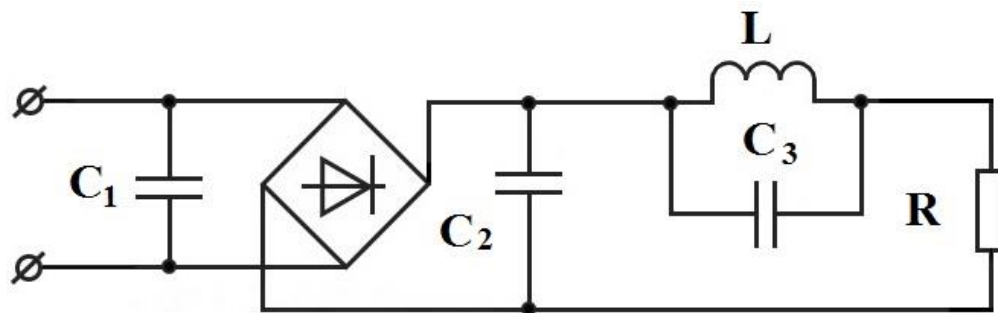


Схема замещения импульсных источников питания бытовых электроприборов:

C_1 – конденсатор подавления ВЧ – помех; C_2 – конденсатор, сглаживающий выходное напряжение мостовой схемы; R – эквивалент нагрузки электроприемника и ВЧ-преобразователя; L – C_3 – контур, корректирующий коэффициент мощности электроприемника.

Эквивалент нагрузки электроприемника и ВЧ-преобразователя рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{C \cdot U^2}{P_n},$$

где U – выходное напряжение мостовой схемы, P_n – активная мощность электроприемника, C – коэффициент сглаживания выпрямленного напряжения.

Параметры схем замещения импульсных источников питания бытовых электроприборов после отладки s-моделей:

Вид электроприемника	P , Вт	R , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	L , мГн
Светодиодная лампа	8	8,5	0,55	3,2	–	–
Телевизор	300	0,31	0,15	607	0,83	35
ПК	250	0,37	0,62	3,2	0,9	30
Ноутбук	200	0,484	0,62	3,2	0,9	30

Таблица 3. Расчетные параметры электродвигателей компьютерной модели

Расчетные параметры двигателя	Формулы для расчета	Результаты расчета		
		Насос	Холодильник	Стиральная машина
Номинальное фазное напряжение, В	$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}$	219,4	219,4	219,4
Синхронная скорость, об./мин.	$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{\rho}$	3000	3000	3000
Номинальное скольжение, о.е.	$S_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	0,067	0,067	0,09
Критическое скольжение, о.е.	$s_{кр} = s_n \cdot (m_{макс} + \sqrt{m_{макс}^2 - 1})$	0,22	0.21	0,37
Синхронная скорость, рад/с	$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{\rho}$	157,1	314,16	314,16

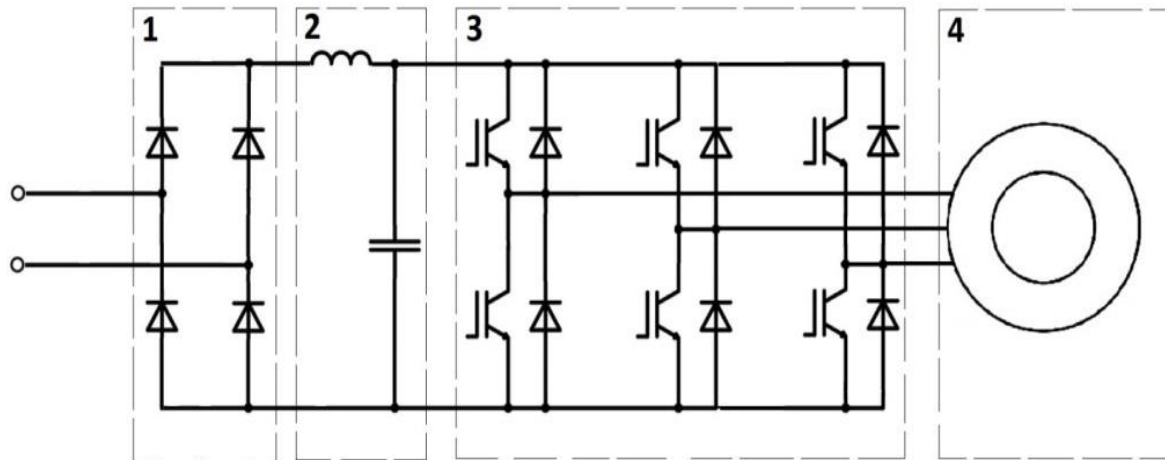
Продолжение таблицы 3. Расчетные параметры электродвигателей компьютерной модели

Номинальная скорость вращения вала, рад/с	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{\rho}$	146,6	293,22	285,89
Номинальный момент, Н·м	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$	15	0,61	1,29
Максимальный момент, Н·м	$M_{\text{макс}} = m_{\text{макс}} \cdot M_n$	27	1,04	2,86
Пусковой момент, Н·м	$M_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot M_n$	25,51	0,31	2,85
Механические потери, Вт	$P_{\text{мех}} = 0,03 \cdot P_n$	66	5,4	11,1
Коэффициент приведения	C	1,013	1,026	1,03
Приведенное активное сопротивление ротора, Ом	$R_p = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_n + P_{\text{мех}}}{I_n^2 \cdot \frac{1 - s_n}{s_n}}$	0,28	1,72	13,08

Окончание таблицы 3. Расчетные параметры электродвигателей компьютерной модели

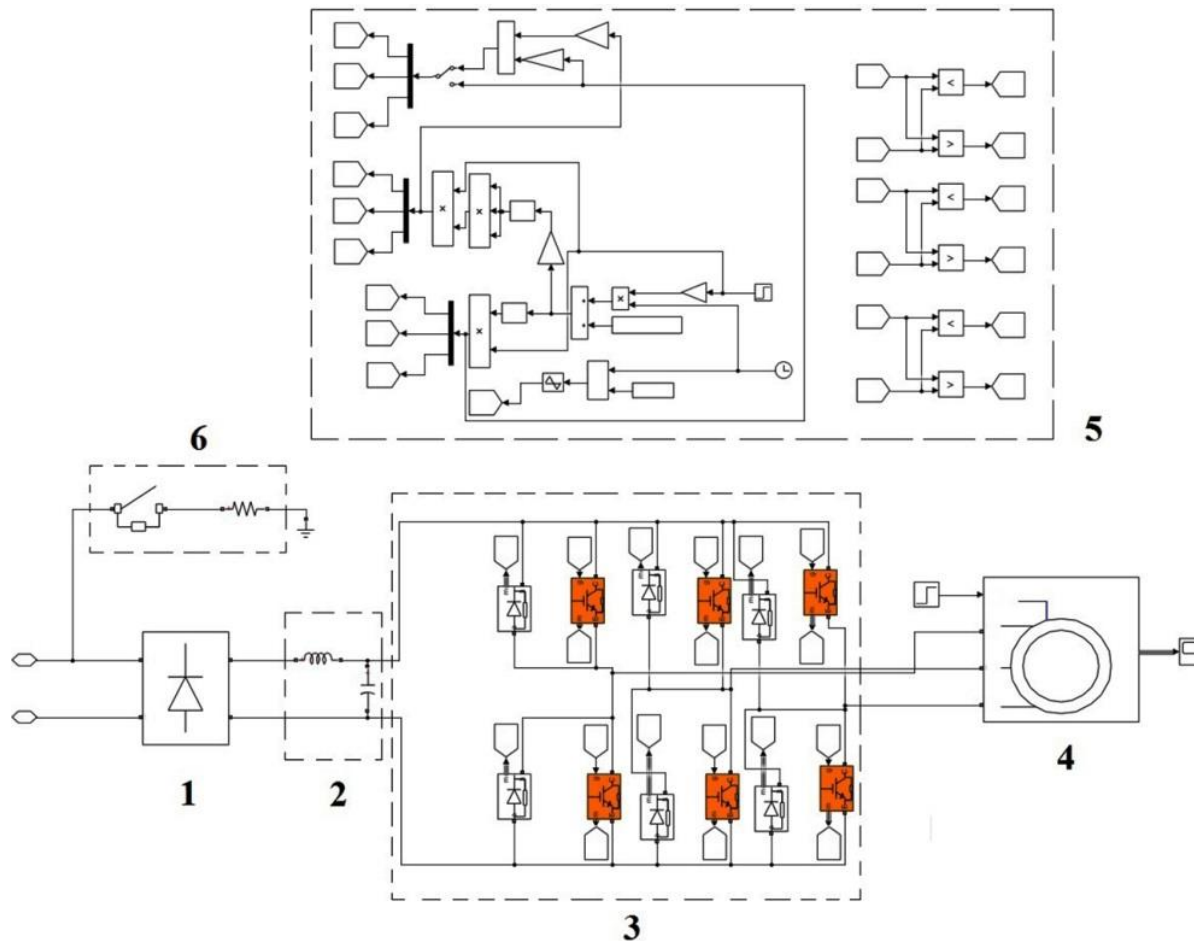
Активное сопротивление статора, Ом	$R_c = \frac{U_\phi \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_n} - C^2 \cdot R_p - \frac{P_{\text{мех}}}{3 \cdot I_n^2}$	3,18	52,99	33,04
Приведенная индуктивность рассеяния статора (ротора), Гн	$L_{cn} = L_{pn} = \frac{U_\phi}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot k_l \cdot I_n}$	0,002	0,028	0,03
Индуктивность статора, Гн	$L_c = \frac{U_\phi}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_n \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot M_{\text{макс}}}{p \cdot U_\phi} \cdot \frac{s_n}{s_{\text{кр}}}}$	0,16	1,12	1,22
Индуктивность цепи намагничивания, Гн	$L_M = L_c - L_{\text{СП}}$	0,16	1,09	1,19

Частотно-регулируемый электропривод в компьютерной модели



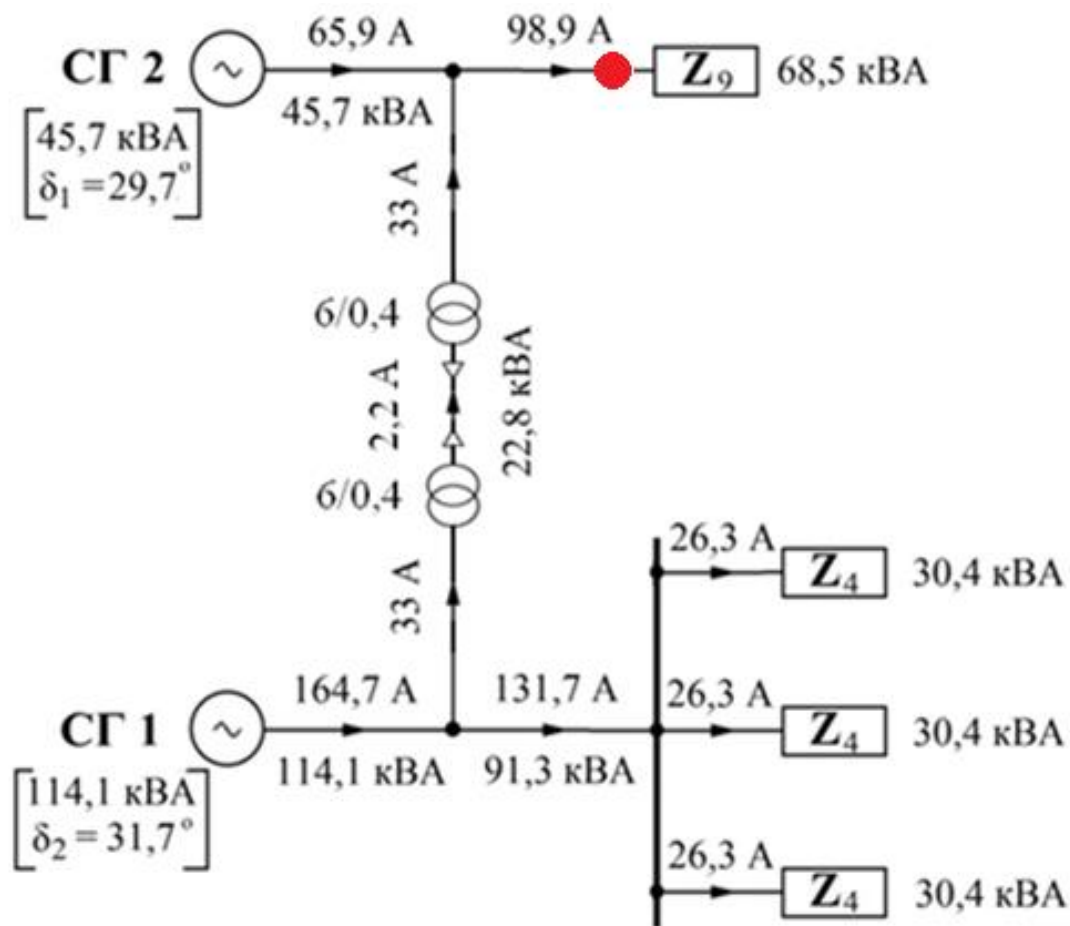
Структурная схема преобразователя частоты:

- 1 - мостовой выпрямитель; 2 - звено постоянного тока;
- 3 - инверторный преобразователь; 4 - электродвигатель

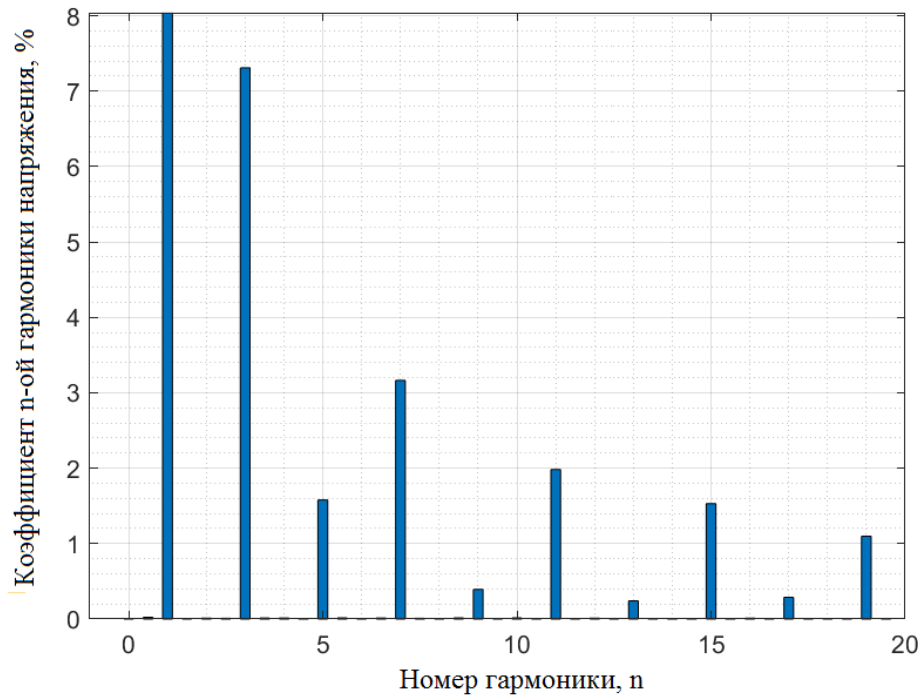
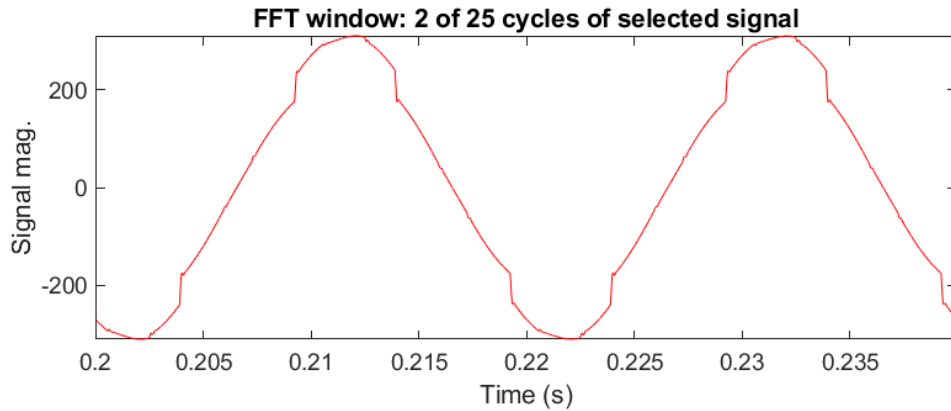


Подсистема s-модели электропривода: 1 – мостовой выпрямитель; 2 – звено постоянного тока; 3 – инверторный преобразователь; 4 – трехфазный асинхронный двигатель; 5 – блок управления; 6 – водонагреватель

Результаты моделирования параметров режима энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой



Оценка гармонических искажений фазного напряжения в точке питания нагрузки 9 жилых зданий:

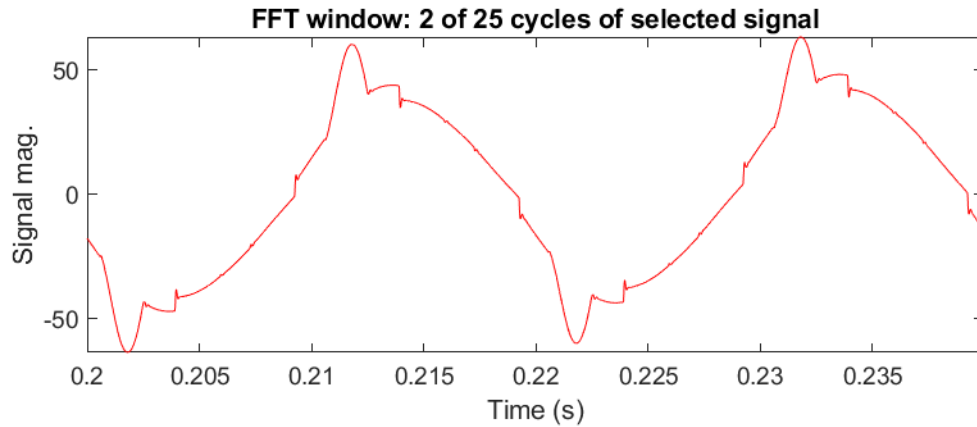


```

Sampling time = 1.18165e-06 s
Samples per cycle = 16926
DC component = 0.01333
Fundamental = 296.3 peak (209.5 rms)
THD = 8.88%
    
```

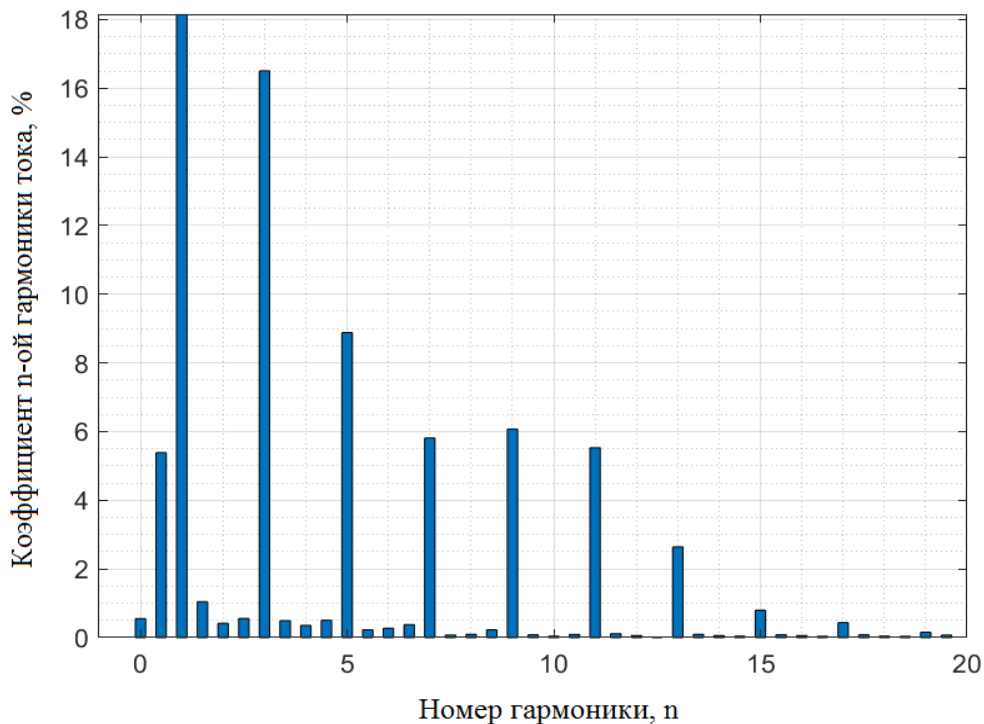
0 Hz (DC) :	0.00%	270.0°
25 Hz	0.02%	-4.2°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	241.1°
75 Hz	0.00%	261.8°
100 Hz (h2) :	0.01%	87.5°
125 Hz	0.01%	59.2°
150 Hz (h3) :	7.31%	170.8°
175 Hz	0.01%	-26.6°
200 Hz (h4) :	0.01%	81.0°
225 Hz	0.01%	86.8°
250 Hz (h5) :	1.58%	-46.5°
275 Hz	0.02%	-48.1°
300 Hz (h6) :	0.01%	185.0°
325 Hz	0.01%	41.5°
350 Hz (h7) :	3.16%	248.6°
375 Hz	0.01%	269.1°
400 Hz (h8) :	0.01%	121.9°
425 Hz	0.02%	-8.5°
450 Hz (h9) :	0.39%	-68.2°
475 Hz	0.01%	260.2°
500 Hz (h10) :	0.02%	261.2°
525 Hz	0.00%	-59.1°
550 Hz (h11) :	1.98%	-56.1°
575 Hz	0.00%	193.3°
600 Hz (h12) :	0.01%	180.9°
625 Hz	0.00%	252.8°
650 Hz (h13) :	0.24%	137.6°
675 Hz	0.01%	90.0°
700 Hz (h14) :	0.01%	-55.7°
725 Hz	0.01%	226.3°

Оценка гармонических искажений тока в точке питания нагрузки 9 жилых зданий:

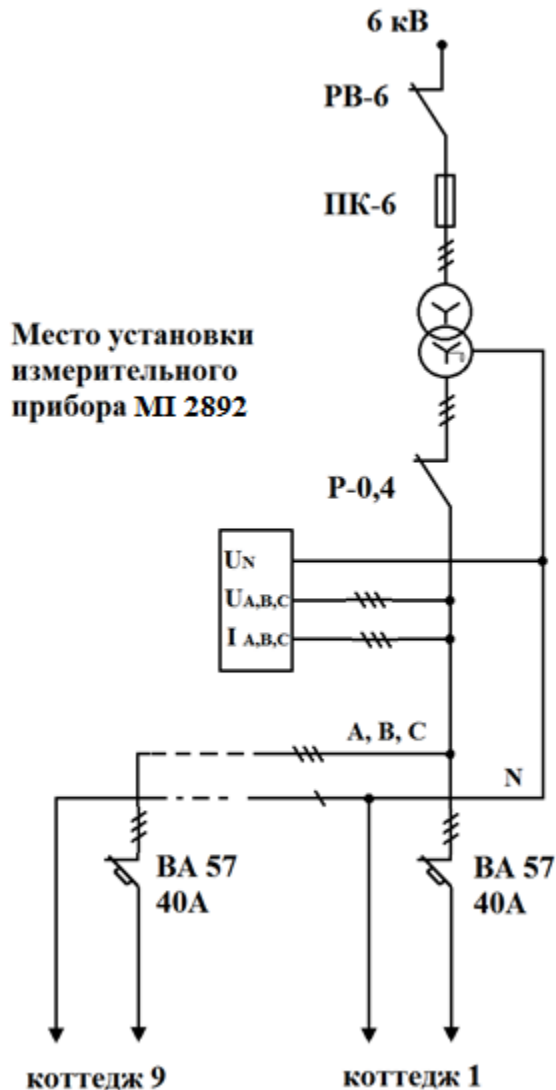


Sampling time	=	1.18165e-06 s
Samples per cycle	=	16926
DC component	=	0.2633
Fundamental	=	47.7 peak (33.73 rms)
THD	=	21.67%

Frequency (Hz)	Order (h)	Percentage (%)	Phase (degrees)
0 Hz	(DC)	0.55%	90.0°
25 Hz		5.39%	182.9°
50 Hz	(Fnd)	100.00%	206.5°
75 Hz		1.05%	174.2°
100 Hz	(h2)	0.42%	183.9°
125 Hz		0.56%	214.8°
150 Hz	(h3)	16.50%	172.1°
175 Hz		0.49%	145.6°
200 Hz	(h4)	0.36%	189.7°
225 Hz		0.50%	192.8°
250 Hz	(h5)	8.88%	118.5°
275 Hz		0.23%	105.9°
300 Hz	(h6)	0.27%	153.6°
325 Hz		0.38%	160.1°
350 Hz	(h7)	5.81%	58.6°
375 Hz		0.07%	37.2°
400 Hz	(h8)	0.10%	119.0°
425 Hz		0.23%	124.6°
450 Hz	(h9)	6.07%	-1.8°
475 Hz		0.08%	-82.0°
500 Hz	(h10)	0.04%	207.1°
525 Hz		0.09%	89.3°
550 Hz	(h11)	5.53%	-60.2°
575 Hz		0.11%	229.0°
600 Hz	(h12)	0.06%	199.4°
625 Hz		0.00%	236.5°
650 Hz	(h13)	2.64%	229.0°
675 Hz		0.10%	201.3°
700 Hz	(h14)	0.06%	206.9°
725 Hz		0.04%	206.3°



Результаты измерений гармонических искажений напряжения и тока в системе электроснабжения коттеджного поселка



Технические характеристики прибора контроля качества электрической энергии

Контролируемый параметр	Диапазон измерения	Разрешение	Погрешность измерения
Напряжение	50...1000	10 мВ	$\pm 0,1\%$
	50...1730 В	100 мВ	
Ток	0,05...1200 А	0,01 А	$\pm 0,5\%$
Частота	42,5...57,5 Гц (при $f_{ном}=50$ Гц)	1 мГц	± 10 мГц
	51...69 Гц (при $f_{ном}=60$ Гц)	1 мГц	± 10 мГц
	335...465 Гц (при $f_{ном}=400$ Гц)	10 мГц	± 100 мГц
Коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательностям	0,0...17,0%	0,10%	$\pm 1\%$
Величина провала и перенапряжения	10...150% $U_{ном}$	10 мВ	$\pm 0,2\% U_{ном}$
Величина остаточного напряжения при прерывании	0...10% $U_{ном}$	10 мВ	$\pm 0,2\% U_{ном}$

Таблица 4. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в 3-х фазах, n = 2-11:

№ п/п	$K_{UA(2)}$ %	$K_{UB(2)}$ %	$K_{UC(2)}$ %	$K_{UA(3)}$ %	$K_{UB(3)}$ %	$K_{UC(3)}$ %	$K_{UA(4)}$ %	$K_{UB(4)}$ %	$K_{UC(4)}$ %	$K_{UA(5)}$ %	$K_{UB(5)}$ %	$K_{UC(5)}$ %	$K_{UA(6)}$ %	$K_{UB(6)}$ %	$K_{UC(6)}$ %
1	0	0	0	7,3	7,1	7,4	0	0	0	1,4	1,4	1,4	0	0	0
2	0	0	0	7,3	7,1	7,3	0	0	0	1,5	1,6	1,6	0	0	0
3	0	0	0	7,1	7	7,3	0	0	0	1,3	1,7	1,7	0	0	0

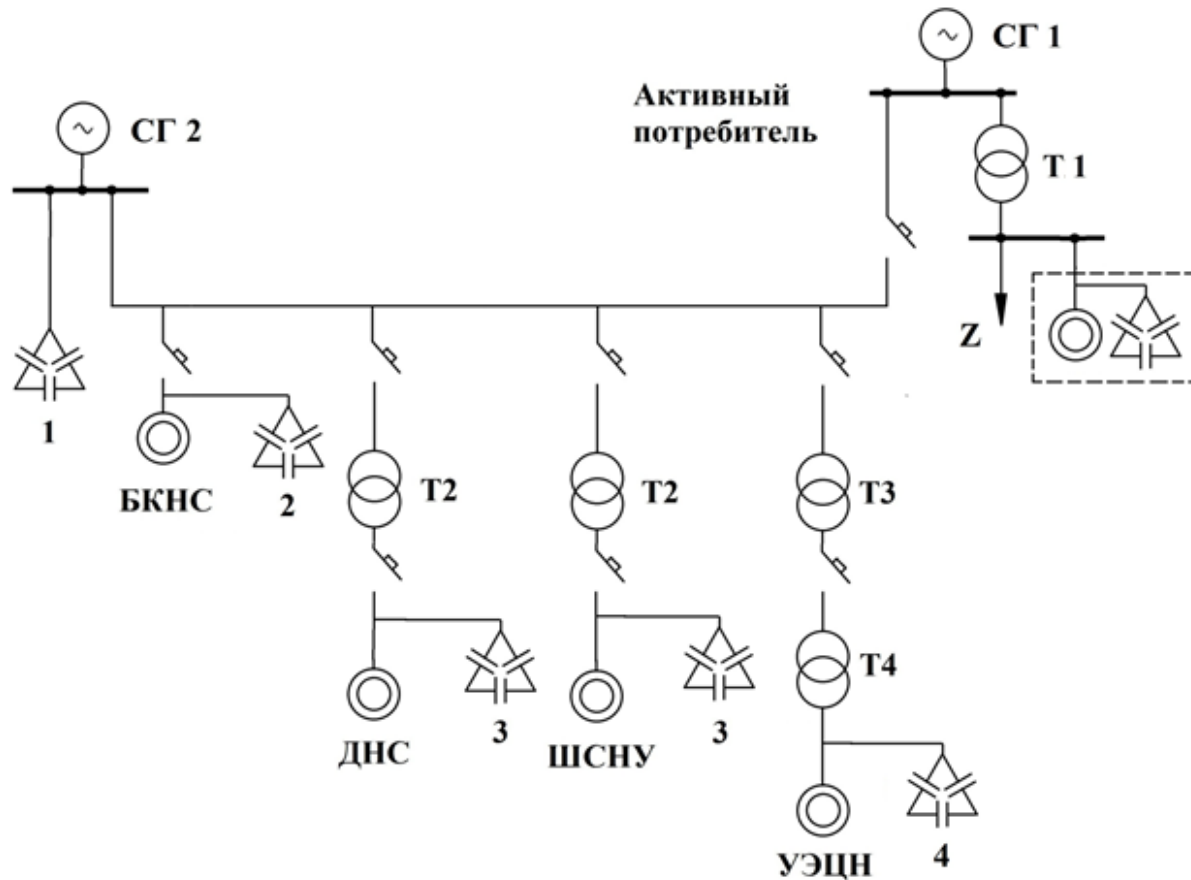
№ п/п	$K_{UA(7)}$ %	$K_{UB(7)}$ %	$K_{UC(7)}$ %	$K_{UA(8)}$ %	$K_{UB(8)}$ %	$K_{UC(8)}$ %	$K_{UA(9)}$ %	$K_{UB(9)}$ %	$K_{UC(9)}$ %	$K_{UA(10)}$ %	$K_{UB(10)}$ %	$K_{UC(10)}$ %	$K_{UA(11)}$ %	$K_{UB(11)}$ %	$K_{UC(11)}$ %
1	3,2	3,3	3,3	0	0	0	0,4	0,4	0,4	0	0	0	1,9	2,2	2,1
2	3,1	3,3	3,1	0	0	0	0,5	0,5	0,4	0	0	0	2,1	2,2	2,1
3	3,1	3,3	3,3	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0	2,1	2,2	2,1

Таблица 5. Коэффициенты гармонических составляющих тока в 3-х фазах, n = 2-11:

№ п/п	$K_{IA(2)}$ %	$K_{IB(2)}$ %	$K_{IC(2)}$ %	$K_{IA(3)}$ %	$K_{IB(3)}$ %	$K_{IC(3)}$ %	$K_{IA(4)}$ %	$K_{IB(4)}$ %	$K_{IC(4)}$ %	$K_{IA(5)}$ %	$K_{IB(5)}$ %	$K_{IC(5)}$ %	$K_{IA(6)}$ %	$K_{IB(6)}$ %	$K_{IC(6)}$ %
1	0,2	0,2	0,1	16,6	16,3	16,5	0	0	0	8,8	8,3	8,4	0	0,1	0
2	0,2	0,1	0,1	16,7	16,1	16,4	0	0,1	0	8,7	8,2	8	0	0	0
3	0,1	0,2	0,2	16,8	16,8	16,7	0	0,1	0	8,4	8,3	8,6	0	0	0

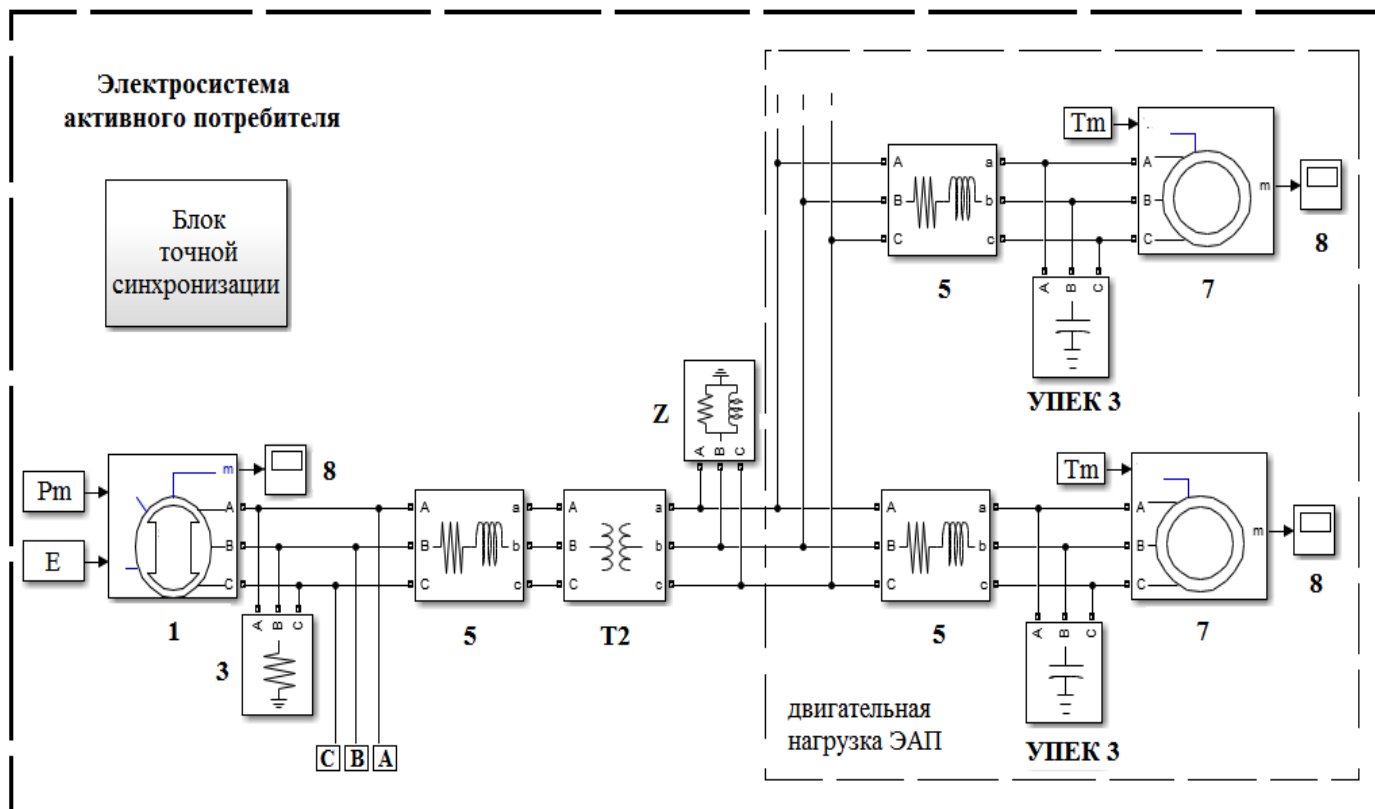
№ п/п	$K_{IA(7)}$ %	$K_{IB(7)}$ %	$K_{IC(7)}$ %	$K_{IA(8)}$ %	$K_{IB(8)}$ %	$K_{IC(8)}$ %	$K_{IA(9)}$ %	$K_{IB(9)}$ %	$K_{IC(9)}$ %	$K_{IA(10)}$ %	$K_{IB(10)}$ %	$K_{IC(10)}$ %	$K_{IA(11)}$ %	$K_{IB(11)}$ %	$K_{IC(11)}$ %
1	4,3	4,3	4,2	0	0	0	6,5	6,5	6,2	0	0	0,1	5,3	5	5,5
2	4,6	4	4,2	0	0	0	6,6	6,5	6,1	0	0	0	5	5,8	5,4
3	4,7	4,1	4,9	0	0	0	6,8	6,7	6,3	0	0	0	5,2	5,5	5,5

Выбор схемы промышленного энергорайона и расчет параметров её элементов



Принципиальная схема системы электроснабжения электротехнического комплекса основного оборудования отходящей линии для предварительной подготовки нефти: СГ1, СГ2 – синхронные генераторы; Т1, Т2, Т3 – силовые трансформаторы 6/0,4; Т4 – силовой трансформатор 0,4/2; 1-4 – установки поперечной емкостной компенсации

Компьютерная модель изолированного или находящегося в островном режиме работы промышленного энергорайона с распределенными источниками энергии



Структурная схема s-модели: 1, 2 – синхронные генераторы; 3 – активная нагрузка (собственные нужды генератора); 4 – управляемый выключатель; 5 – линия электропередачи; 6 – низковольтный преобразователь частоты; 7 – асинхронный двигатель ВАО-72-2; 8 – осциллограф; Т1 – Т5 – силовые трансформаторы; УПЕК 1 – УПЕК 4 – установки поперечной емкостной компенсации

Таблица 6. Параметры синхронных генераторов компьютерной модели

Параметры s-модели	Генератор 1	Генератор 2
Номинальная мощность, кВА	787,5	3125
Номинальное напряжение, кВ	6,3	6,3
Номинальная частота, Гц	50	50
Момент инерции, кг·м ²	400	390
Инерционная постоянная, с	0,368	6,159
Демпфирующий коэффициент	8,33	32,75
Активное сопротивление статора, Ом	0,186	0,0318
Индуктивность, Гн	0,202	0,0578
Механическая мощность, кВт	651,98	1000,8
Амплитуда ЭДС, В	6613,6	6932,6

Таблица 7. Значения параметров электродвигателей модели

Параметр	Ед. изм.	Значение		
		БКНС (ВА04-450)	ДНС, ПСНУ (ВА02-72-2)	УЭЦН (ПЭД90-123)
Номинальная полная мощность, P_n	ВА	460000	36000	125000
Номинальное линейное напряжение, V_n	В	6000	380	1950
Номинальная частота, f_n	Гц	50	50	50
Активное сопротивление статора, R_s	Ом	1,95	0,21	2,47
Приведенная индуктивность рассеяния статора, L_{I_s}	Гн	0,01	0,00045	0,0034
Приведенное активное сопротивление ротора, R_r	Ом	0,83	0,09	1,17
Приведенная индуктивность рассеяния ротора, L_{I_r}	Гн	0,01	0,00045	0,0034
Индуктивность контура намагничивания, L_m	Гн	0,47	0,03	0,18
Момент инерции ротора, J	кг·м ²	10	0,3	0,88
Коэффициент трения ротора, F	Н·м·с	0,06	0,03	0,04
Число пар полюсов, p	-	2	2	1

Таблица 8. Значения параметров конденсаторной установки

Порядковый номер КУ	1	2	3	4
	СГ 2	БКНС	ДНС, ШСНУ	УЭЦН
Коррекция $\cos\varphi$	0,87→0,95	0,86→0,9	0,79→0,9	0,84→0,9
Мощность КУ, кВар	150	50	10	15

Таблица 9. Значения параметров трансформаторов

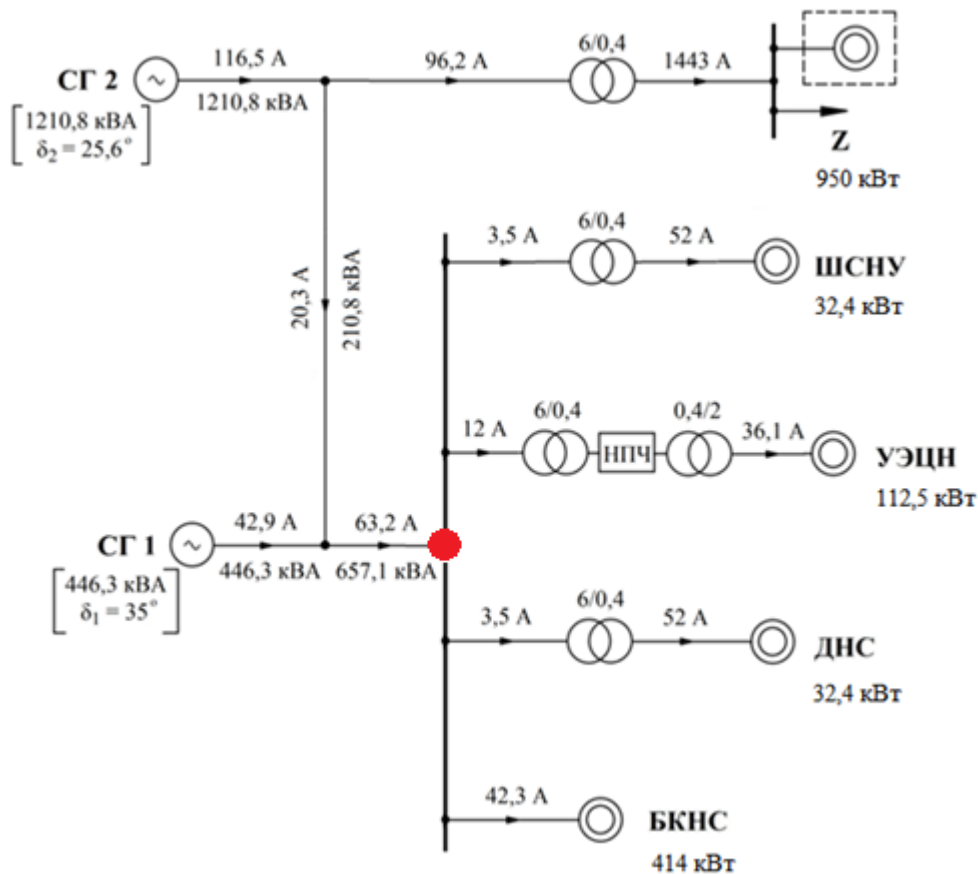
Параметр	Ед. изм.	Значение			
		ТМ-1000	Т2 (ТМГ-40)	Т3 (ТМ-160)	Т4 (ТМН-100)
Номинальная полная мощность, Pn	кВА	1000	40	160	100
Номинальная частота, fn	Гц	50	50	50	50
Номинальное линейное напряжение первичной обмотки, V1 Ph-Ph	кВ	6	6	6	0,4
Номинальное линейное напряжение вторичной обмотки, V2 Ph-Ph	кВ	0,4	0,4	0,4	2
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток, R1 и R2	о.е.	0,006	0,012	0,008	0,01
Индуктивное сопротивление первичной и вторичной обмоток, L1 и L2	о.е.	0,022	0,019	0,02	0,026
Активное сопротивление ветви намагничивания, Rm	о.е.	200	2,6	7,79	14,79
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Lm	о.е.	267	19,83	52,05	69,88

Таблица 10. Значения параметров ЛЭП

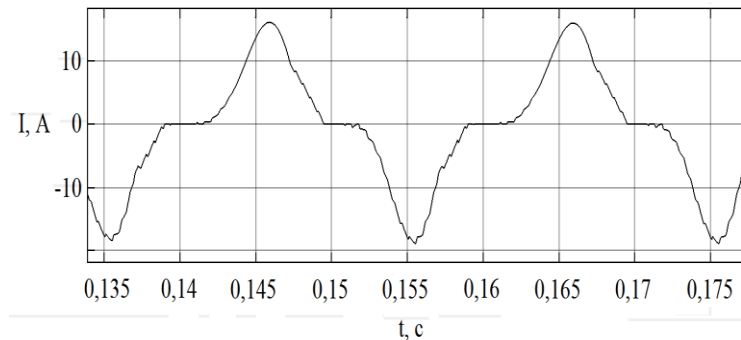
Активный потребитель	БКНС	ДНС, ШСНУ		УЭЦН	
		ВЛ 6 кВ	ВЛ 0,4 кВ	ВЛ 6 кВ	КЛ 2 кВ
СИП-3 1x35 $r_0 = 0,868$ $x_0 = 0,37$ $L = 1$	СИП-3 1x16 $r_0 = 1,91$ $x_0 = 0,39$ $L = 0,5$	СИП-3 1x16 $r_0 = 1,91$ $x_0 = 0,39$ $L = 1$	СИП-2 3x16 $r_0 = 1,91$ $x_0 = 0,39$ $L = 1,5$	СИП-3 1x16 $r_0 = 1,91$ $x_0 = 0,39$ $L = 2$	КПБП 3x16 $r_0 = 1,15$ $L = 3$

Здесь: ВЛ – воздушная ЛЭП, КЛ – кабельная ЛЭП, r_0 и x_0 – удельное активное и реактивное сопротивления ЛЭП (Ом/км), L – длина ЛЭП (км).

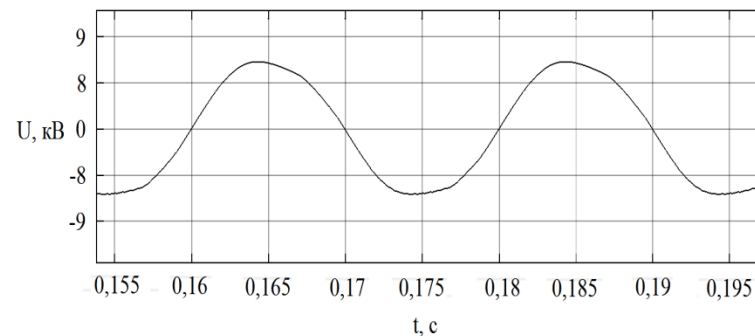
Результаты моделирования установившегося режима работы промышленного энергорайона



Осциллограмма тока нагрузки :



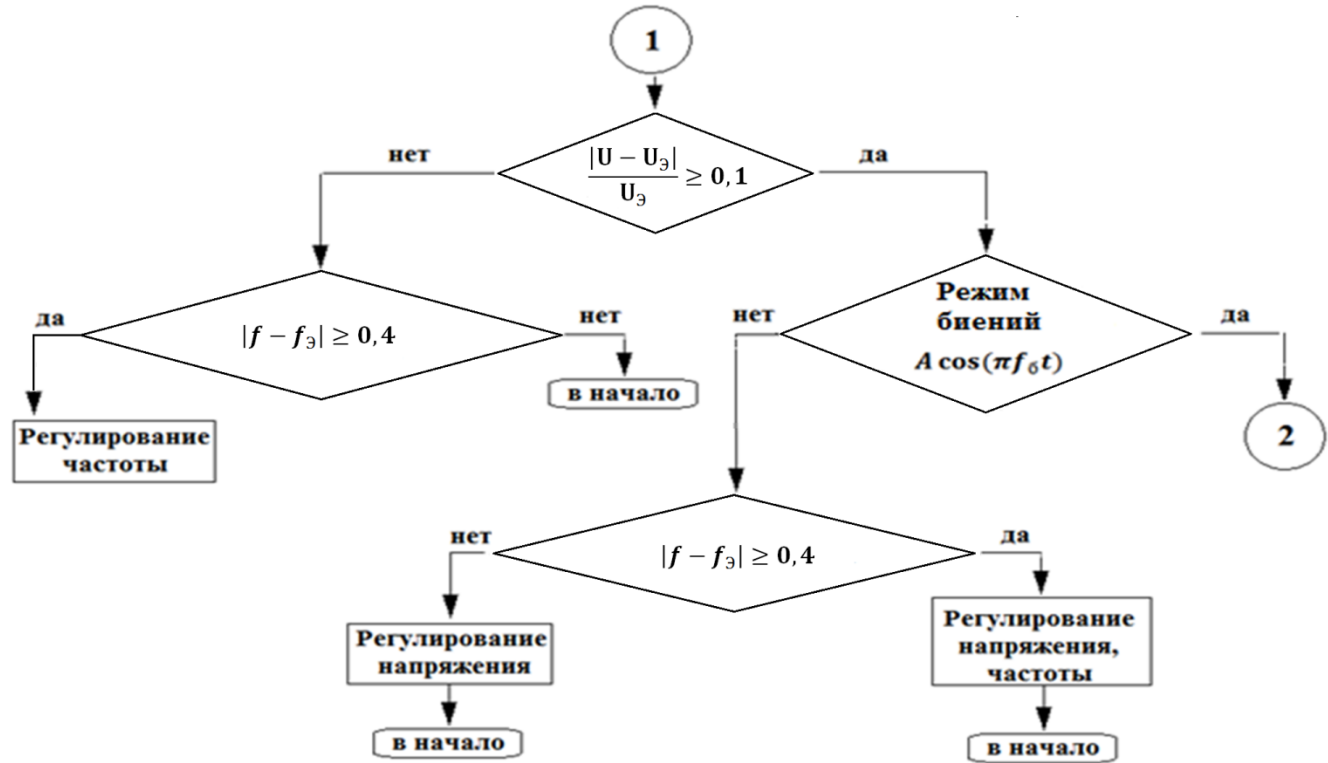
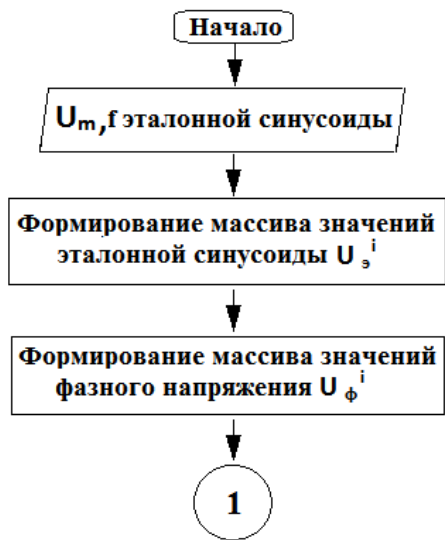
Осциллограмма напряжения в точке присоединения нагрузки :

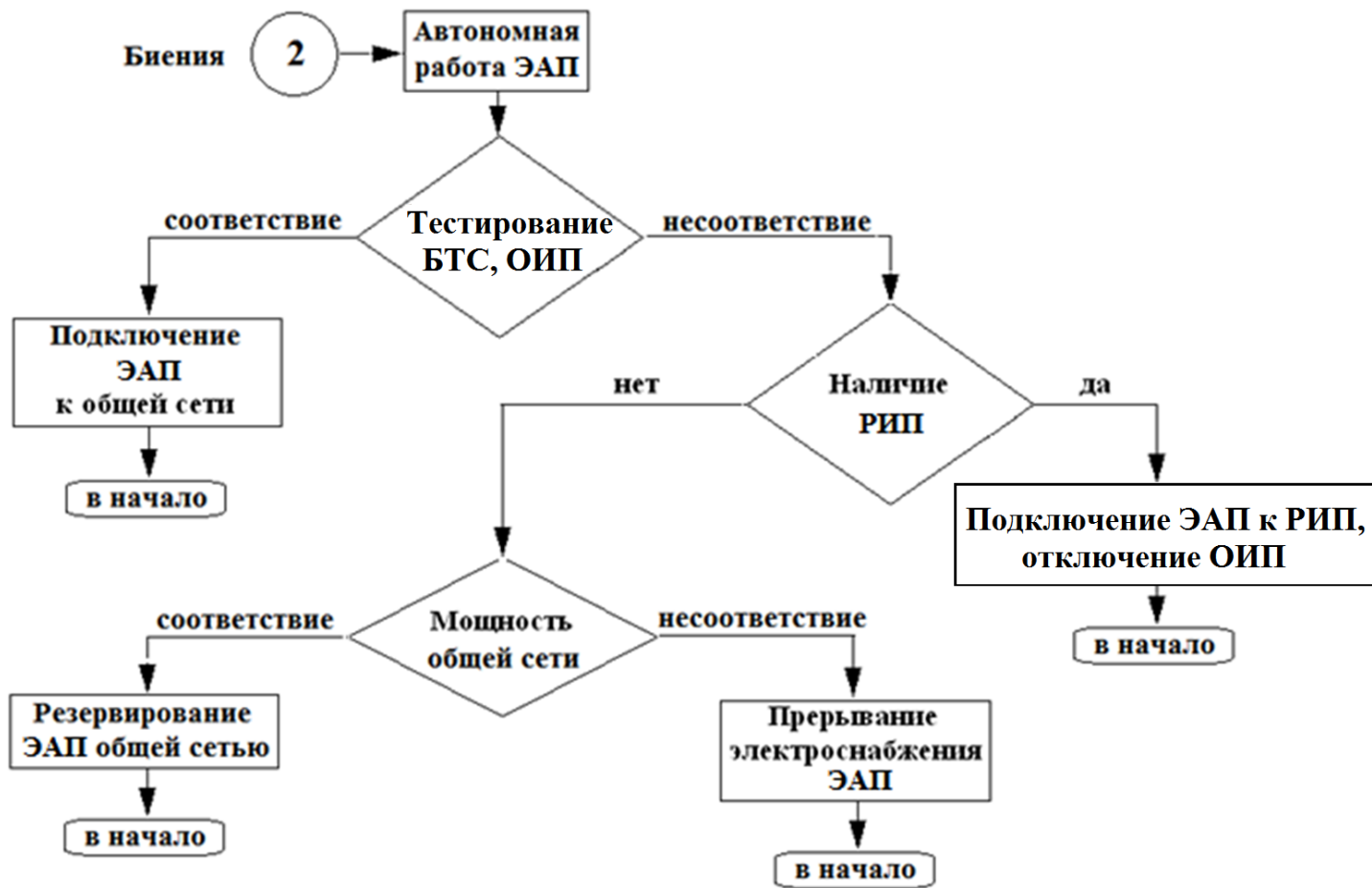


Гармонические искажения тока и напряжения:

n	2	3	4	5	7	9	11	13	Кг
I	1,2	41,2	0,2	5,9	2,8	1,9	1,4	0,6	44,3
U	0,2	4,4	0,03	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	7,3

Методика управления изолированным или находящимся в островном режиме работы энергорайоном





Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения":

$f = (49,6 - 50,4) \text{ Гц}$
6 кВ: (5400 – 6600) В
0,38 кВ: (198 – 242) В

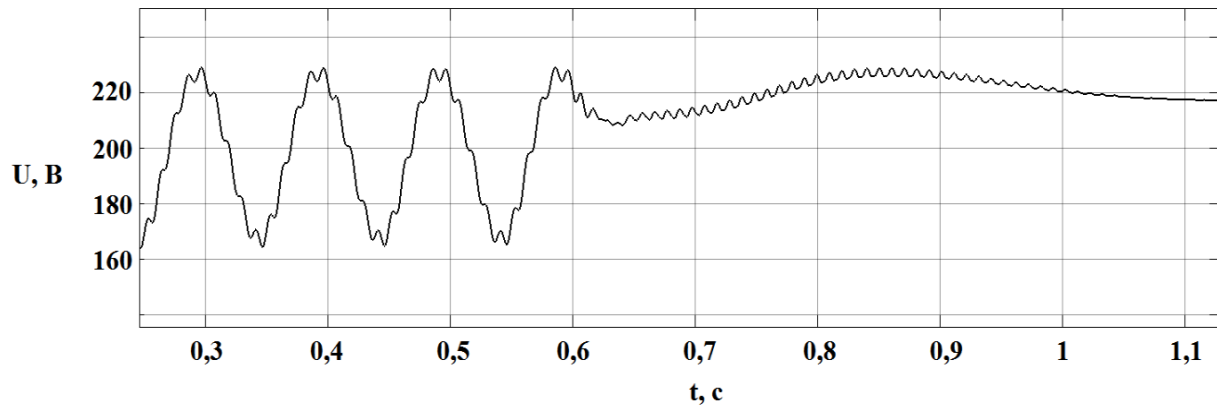


Рис.1. Подавление режима биений в энергорайоне с коммунально-бытовой нагрузкой при разнице частот источников питания 5 Гц

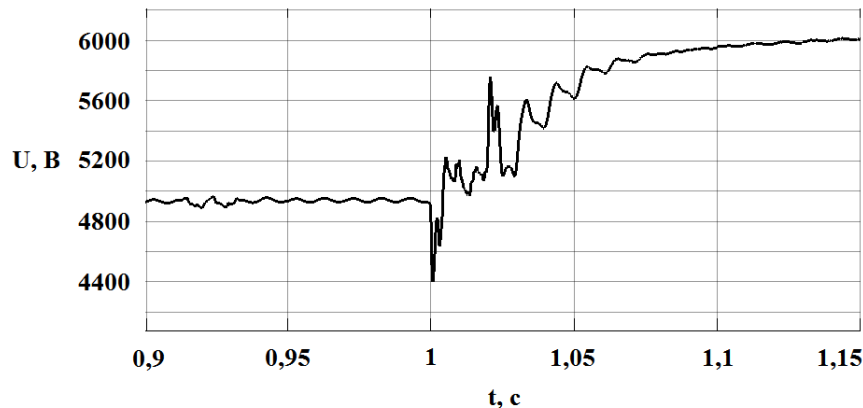


Рис.2. Регулирование напряжения в узле промышленного энергорайона при подключении КУ 1408,5 кВАр

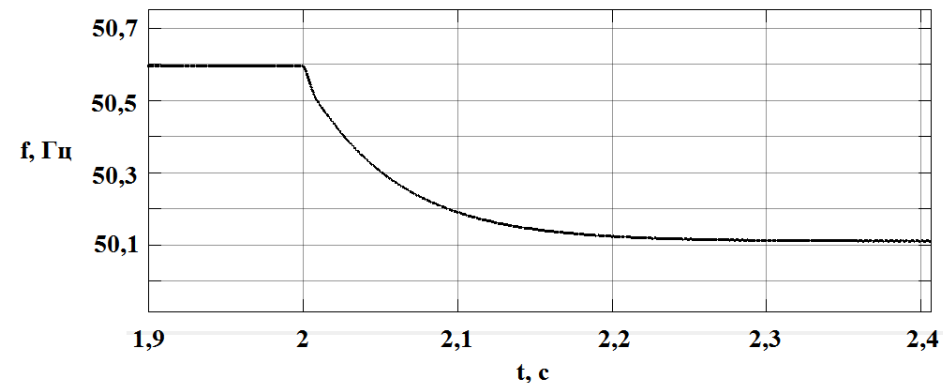


Рис.3. Регулирование частоты в изолированном энергорайоне с коммунально-бытовой нагрузкой при подключении БН 26 кВт

Методика минимизации потерь мощности при передаче электроэнергии в изолированной системе электроснабжения с РИЭ

Основная идея методики заключается в сокращении расстояния между центром электрических нагрузок (ЦЭН) группы потребителей и соответствующим ей источником питания (ИП) за счет подключения потребителей к ИП, находящемуся на меньшем расстоянии от ЦЭН.

Алгоритм системы автоматического управления:

1. Ввод констант (координаты объектов) и измерение переменных (величина нагрузки потребителя):

Координаты потребителей:

Координаты источников питания:

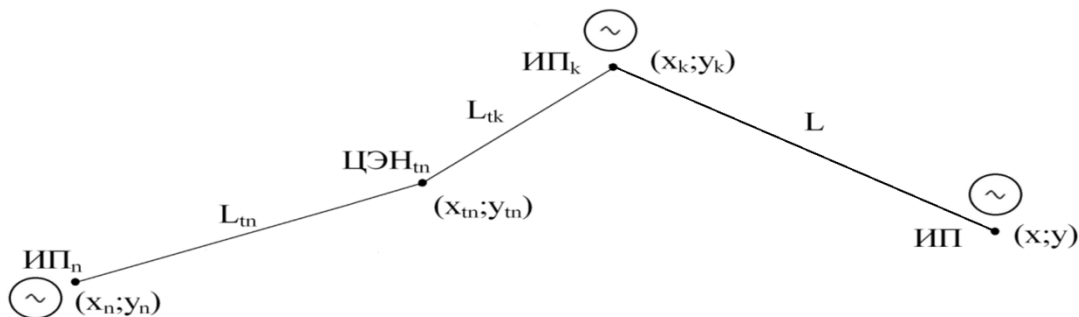
Величины нагрузки потребителей при расчете ЦЭН:

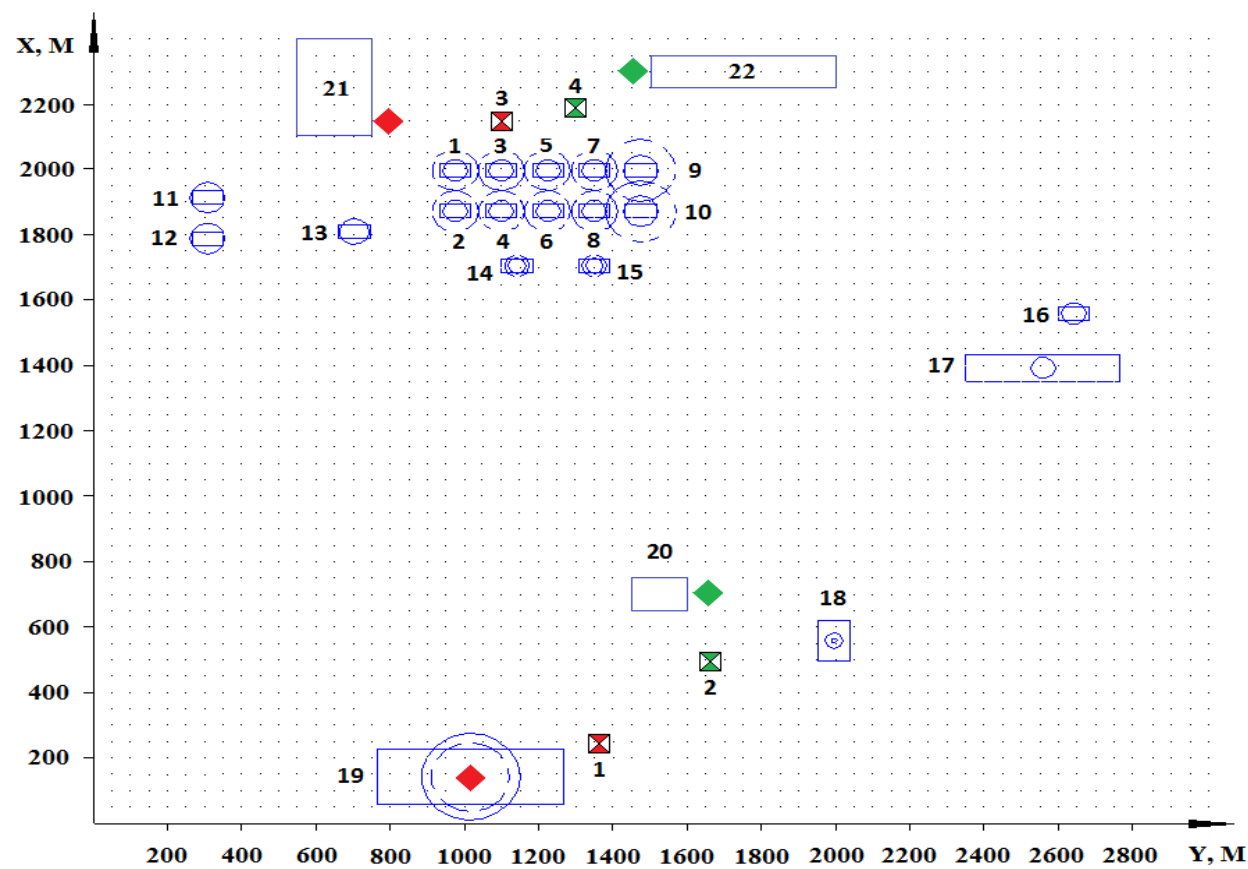
$$K_n = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{pmatrix} \quad ИП_n = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{pmatrix} \quad P_t = \begin{pmatrix} P_{t1} \\ \vdots \\ P_{tN} \end{pmatrix}$$

2. Расчет координат ЦЭН:
$$x_{tn} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i \cdot K_n^{i,1}}{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i} \quad y_{tn} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i \cdot K_n^{i,2}}{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i}$$

3. Расчет расстояний от ЦЭН до источников питания:
$$L_{tk} = \sqrt{(x_{tn} - x_k)^2 + (y_{tn} - y_k)^2}$$

4. Подключение группы потребителей к ближайшему источнику питания после проверки выполнения дополнительных условий, например, возможности утяжеления режима генерирующей установки.





20 – фотоэлектрическая установка
1,3 МВт
(тепличное хозяйство)

21 – ГЭК 6 МВт (ДЭС+ВЭС)

22 – фотоэлектрическая установка
6 МВт
(дачное хозяйство)

- ⊠ - центр электрических нагрузок (утро) ⊠ - центр электрических нагрузок (вечер)
◆ - источник питания (утро) ◆ - источник питания (вечер)

$$\Delta P_n = 3 \cdot I_{tn}^2 \cdot r_{0n} \cdot \Delta L_n$$

$$\Pi = 8760 \cdot \Delta P_n \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot D$$

Группа ЭП	Результаты расчета			
	I_{tn}, A	$\Delta L_n, м$	$\Delta P_n, кВт$	$\Pi, тыс.руб.$
1-15	42,8	305	3,2	41
16-19	168,6	522	57	1476

Феррорезонансные процессы в системе электроснабжения с распределенными источниками энергии

Ниже будут рассмотрены схемно-режимные условия возникновения феррорезонанса в системе электроснабжения КВ-радиоцентра с объектом РГ:

- при использовании объекта РГ в качестве дополнительного источника питания (сглаживание профиля мощности предприятия с резкопеременным характером нагрузки в условиях ценозависимого электропотребления);
- при использовании объекта РГ в качестве основного источника питания (активный потребитель).

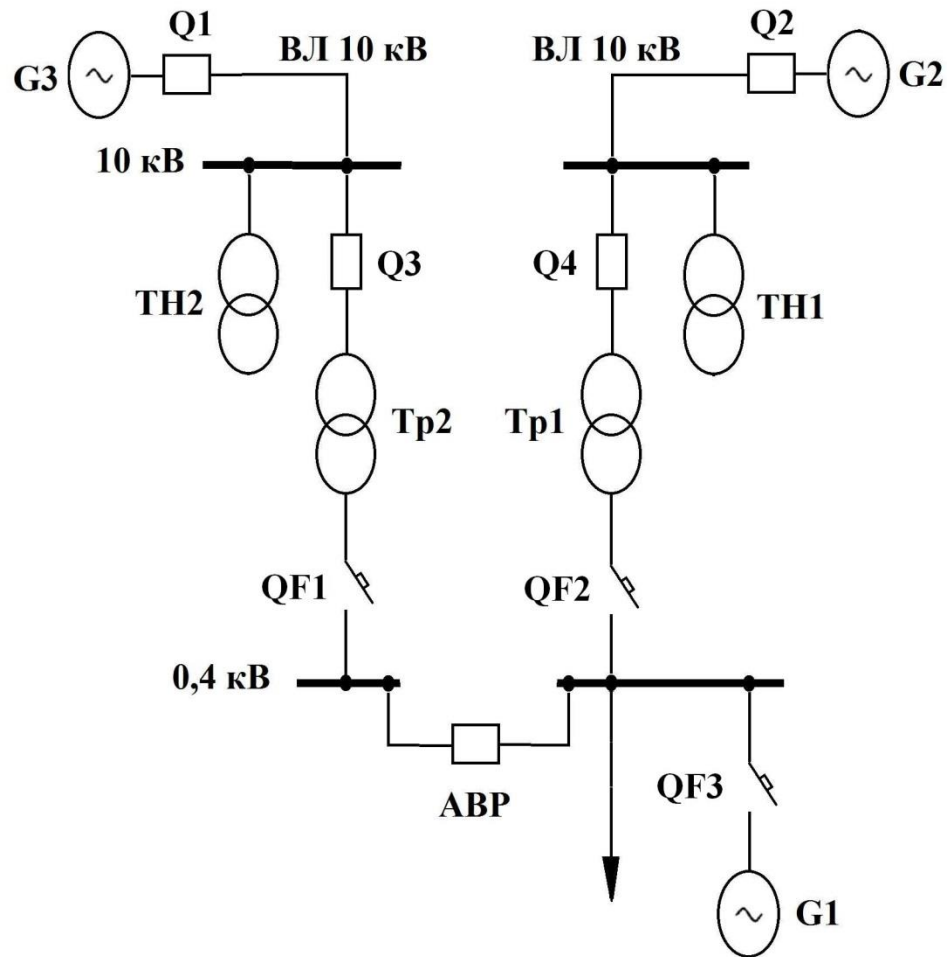


Схема системы электроснабжения КВ-радиоцентра с объектом РГ в функции дополнительного источника питания:

G1 – ГУ РГ; G2 и G3 – электростанции внешней ЭС; ВЛ – воздушная линия электропередачи; TH1 и TH2 – трансформаторы напряжения; Tr1 и Tr2 – силовые трансформаторы; АВР – установка автоматического ввода резерва;
 В1-В7 – выключатели

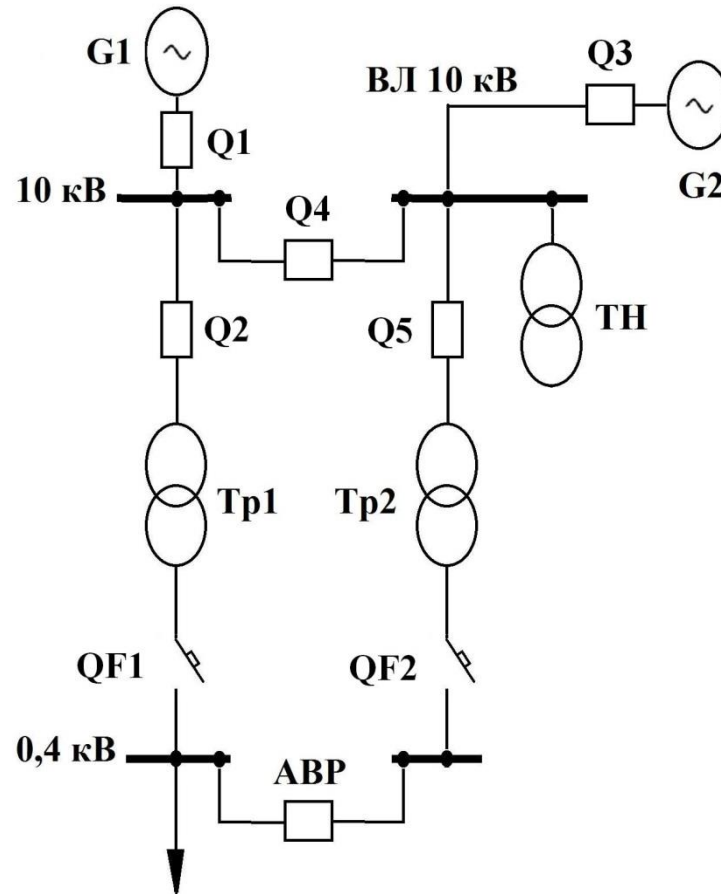


Схема системы электроснабжения КВ-радиоцентра с объектом РГ в функции основного источника питания:

G1 – ГУ РГ; G2 – электростанция внешней ЭС; ВЛ – воздушная линия электропередачи; ТН – трансформатор напряжения; Тр1 и Тр2 – силовые трансформаторы; АВР – установка автоматического ввода резерва;

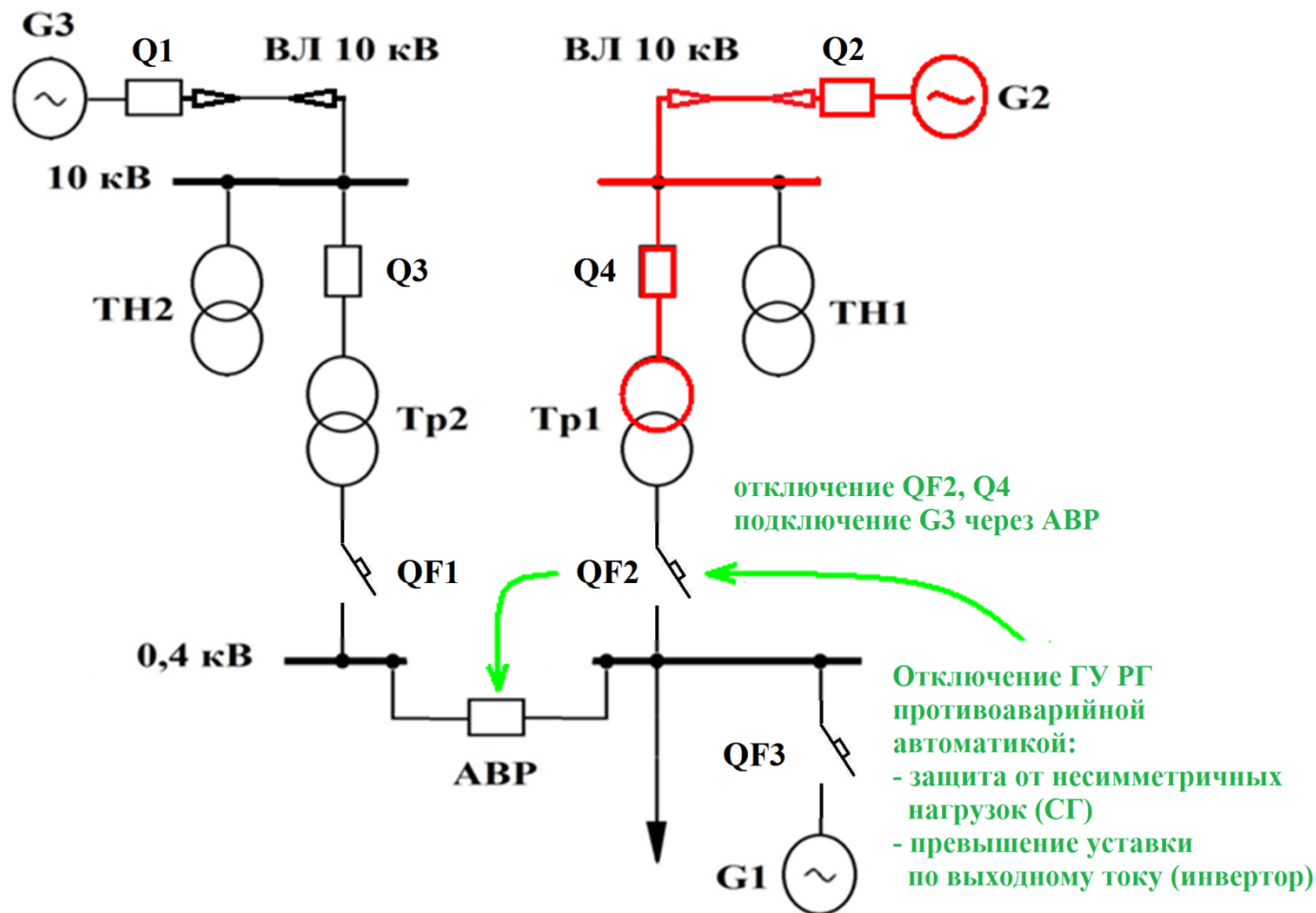
В1-В7 – выключатели

Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 6-35 кВ

Вид ФП	Феррорезонансный колебательный контур	Причина ФП	Мероприятия по защите от ФП
Самопроизвольное смещение нейтрала («ложная земля»)	Индуктивность ТН, емкость сети (элементы сети не повреждаются)	Разновременность включения фаз выключателей при коммутации сети	<ol style="list-style-type: none"> 1. Антирезонансный ТН 2. Установка резистора во вторичную обмотку ТН 3. Установка резистора в разомкнутый треугольник дополнительной обмотки ТН
Субгармонический	Индуктивность ТН, емкость короткой линии (повреждение только ТН)	Соответствие субгармоники резонансной частоте контура	Антирезонансные ТН
ОЗЗ через перемежающуюся дугу	Индуктивность ТН, емкость сети	Перемежающаяся дуга приводит к насыщению магнитопровода ТН	<ol style="list-style-type: none"> 1. Антирезонансные ТН 2. Установка резистора в разомкнутый треугольник дополнительной обмотки ТН
Несимметричная схема сети	Индуктивность силового ТР, емкость сети (повреждение ТН и ОПН)	Неполнофазный режим (обрыв проводов ВЛ, неполнофазные коммутации выключателей, перегорание предохранителей)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Антирезонансные ТН 2. Запрещаются пофазные включения/отключения ВЛ и КЛ 3. Нежелательны подключения силовых ТР через плавкие вставки

Объект РГ: дополнительный источник питания G1

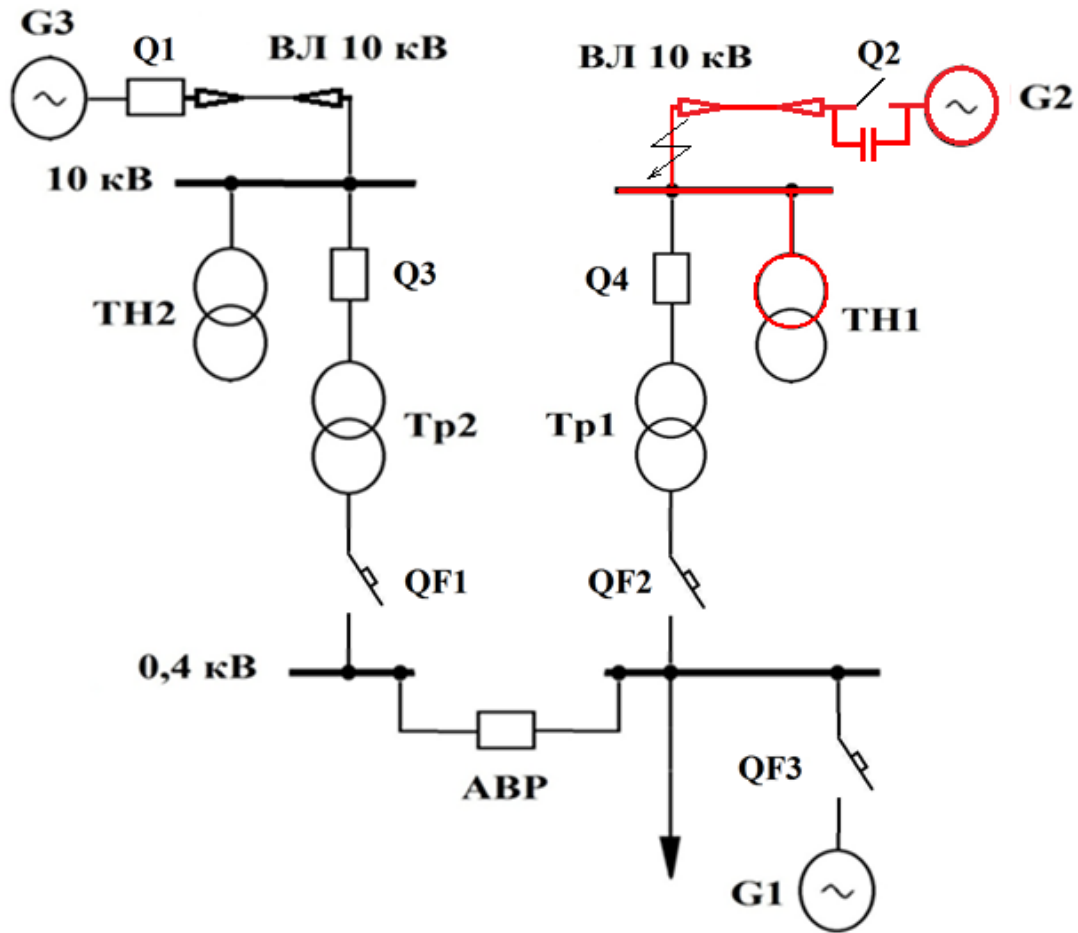
Причина феррорезонанса: несимметричная схема сети при обрыве провода со стороны ВН Тр1



На рисунке красным выделен феррорезонансный контур, зеленым описана работа устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Объект РГ: дополнительный источник питания G1

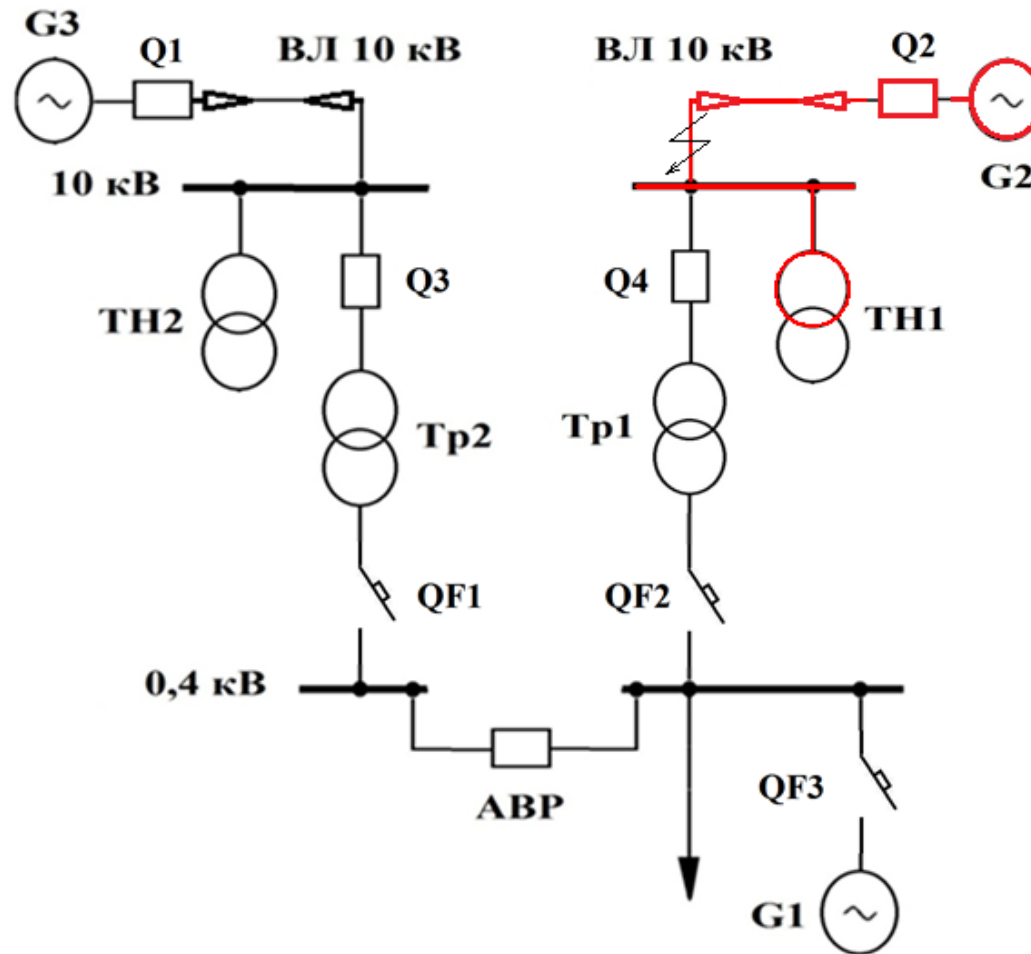
Причина феррорезонанса: прерывание питания от G2 при КЗ на ВЛ



На рисунке красным выделен феррорезонансный контур.

Объект РГ: дополнительный источник питания G1

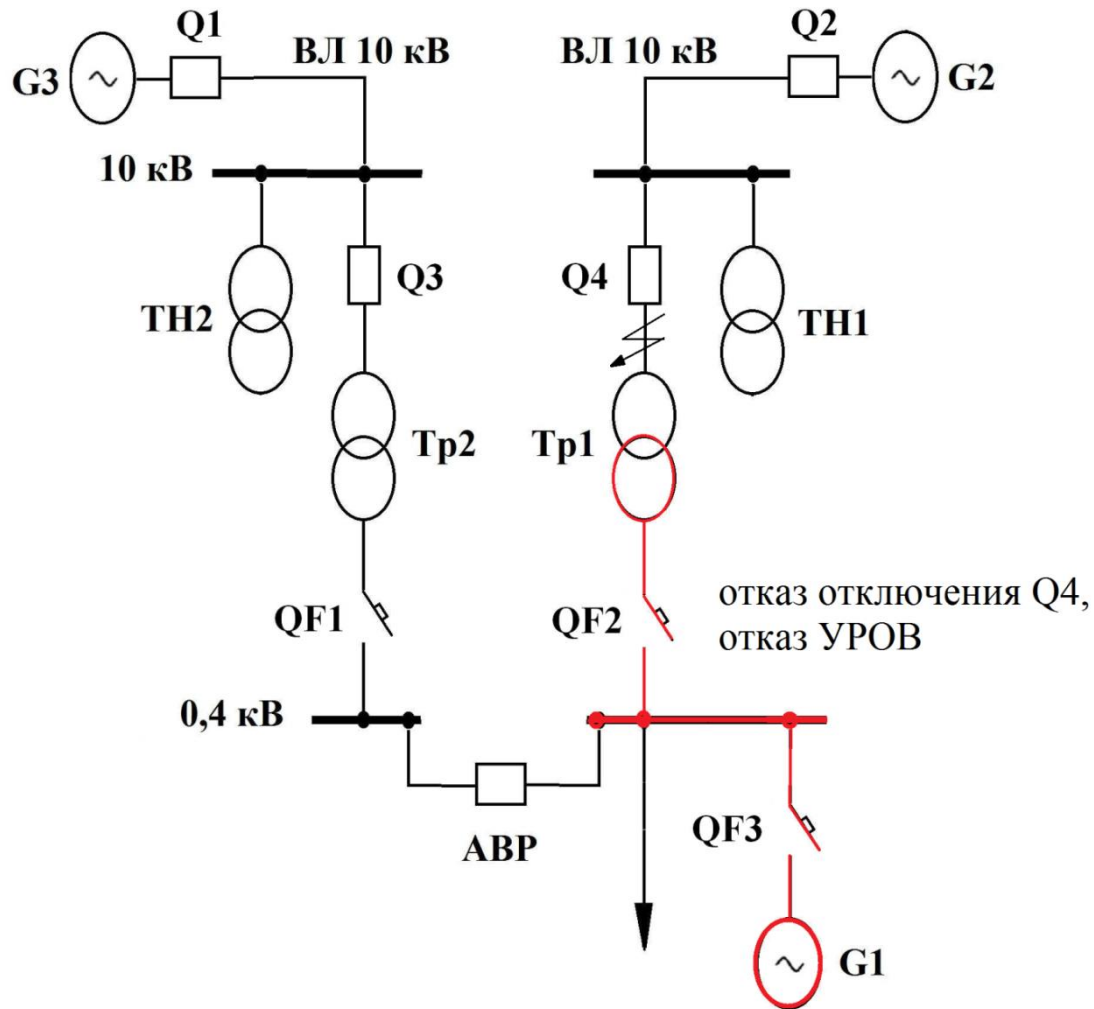
Причина феррорезонанса: «ложная земля» или ОЗЗ через перемежающуюся дугу



На рисунке красным выделен феррорезонансный контур.

Объект РГ: дополнительный источник питания G1

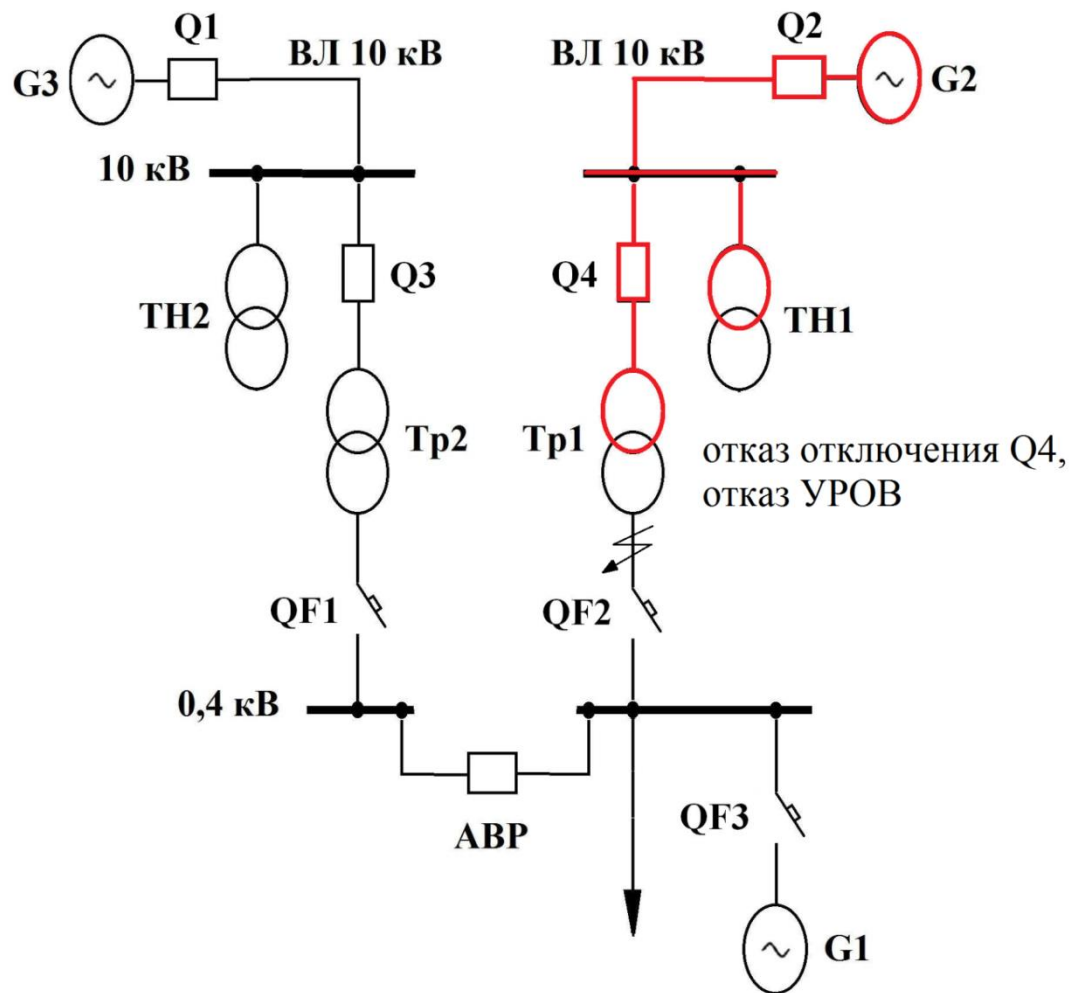
Причина феррорезонанса: одностороннее отключение Tr1 при КЗ со стороны ВН



На рисунке красным выделен феррорезонансный контур.

Объект РГ: дополнительный источник питания G1

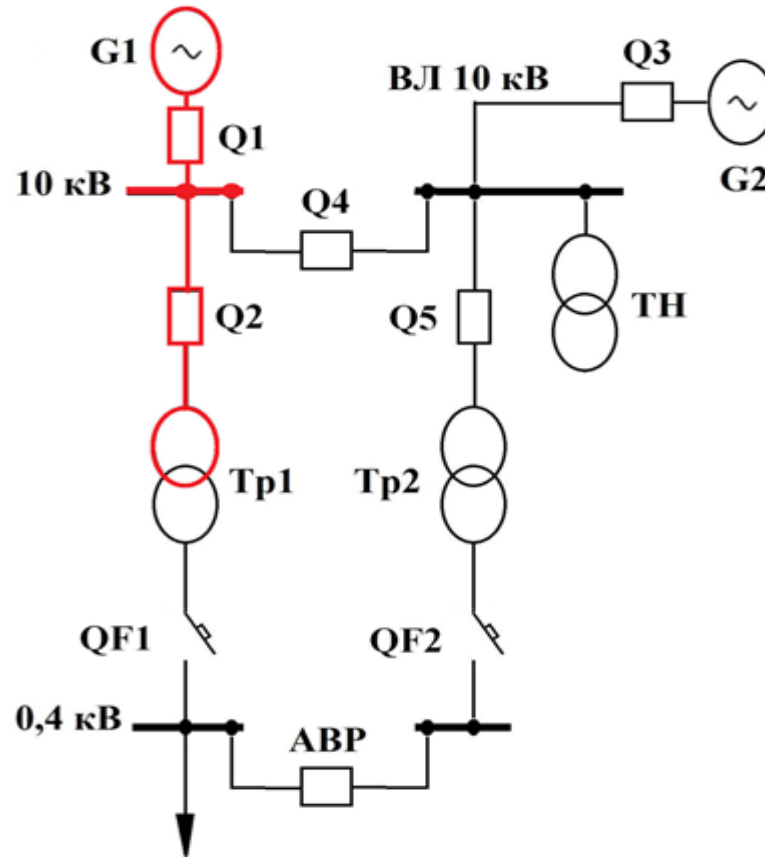
Причина феррорезонанса: одностороннее отключение Тр1 при КЗ со стороны НН



На рисунке красным выделен феррорезонансный контур.

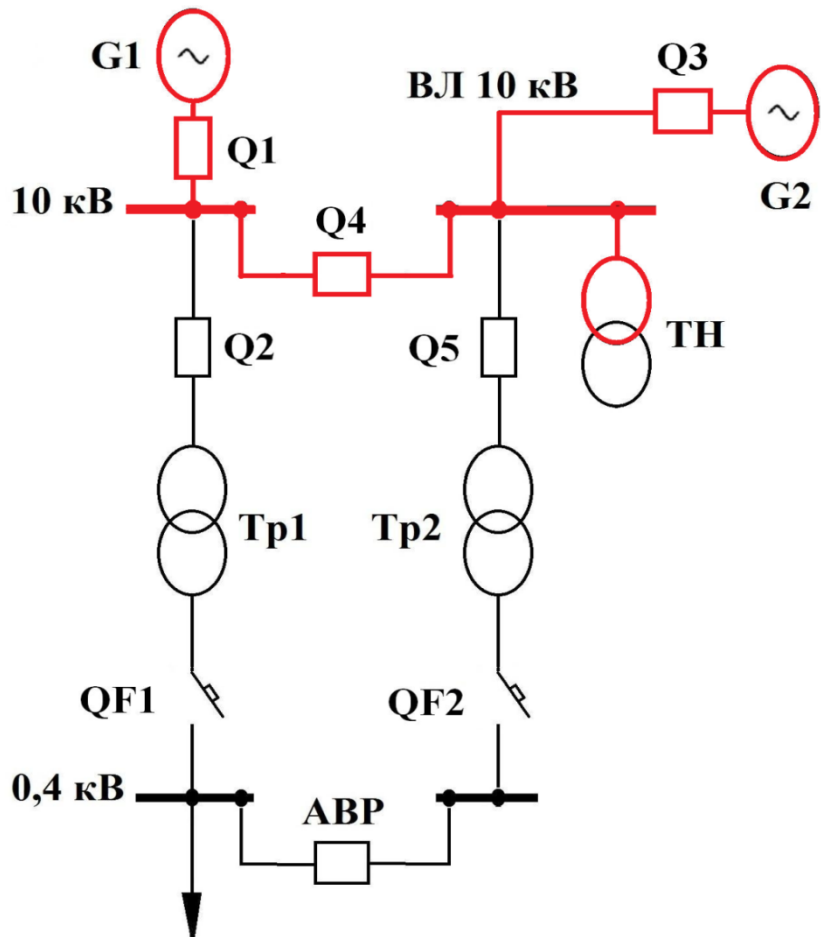
Объект РГ: основной источник питания G1

Причина феррорезонанса: несимметричная схема сети в островном режиме (обрыв провода со стороны ВН)



В островном режиме феррорезонанс при ОЗЗ невозможен по устойчивости ГУ РГ G1. Короткая ЛЭП между G1 и Tr1 при воздушном исполнении не обладает достаточной емкостью для возникновения феррорезонанса. Емкость кабельной линии достаточна для возникновения субгармонического феррорезонанса.

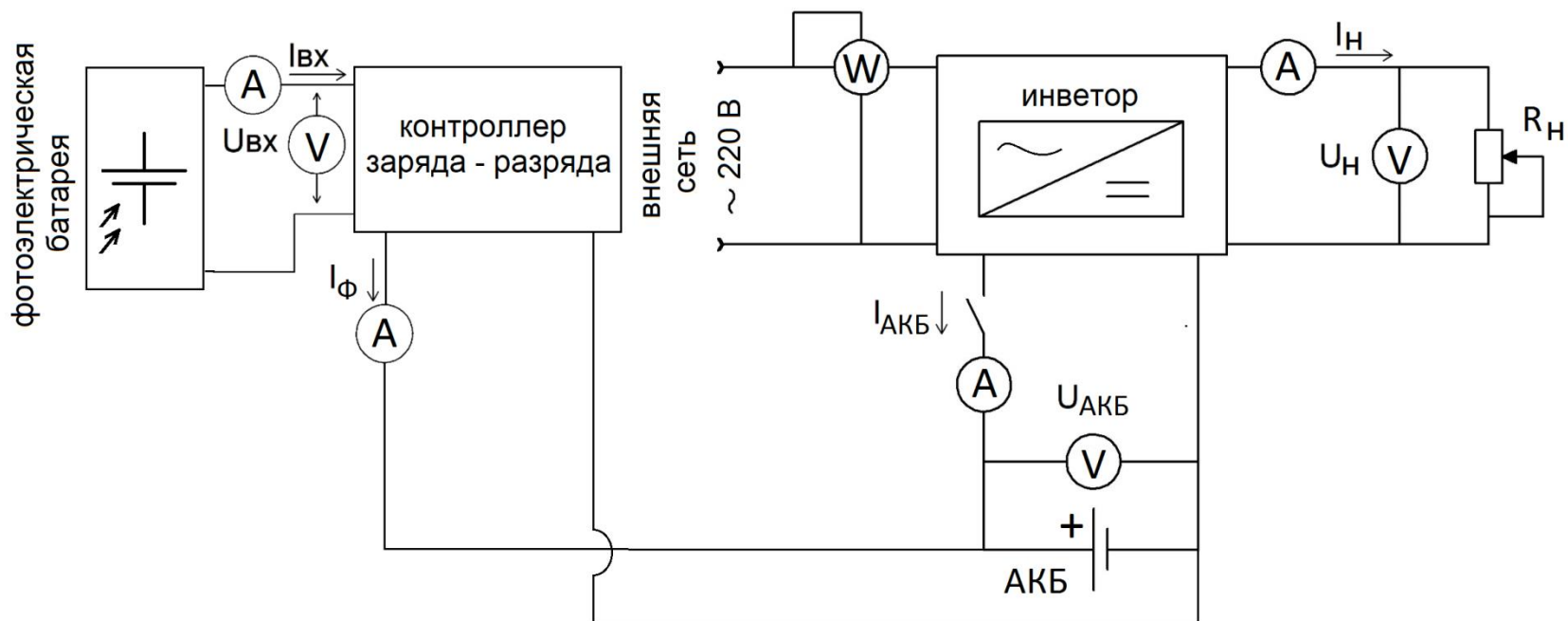
Объект РГ: основной источник питания G1, включенный на параллельную работу с внешней сетью G2
Причина феррорезонанса: ОЗЗ через перемежающуюся дугу со стороны G2 или «ложная земля»



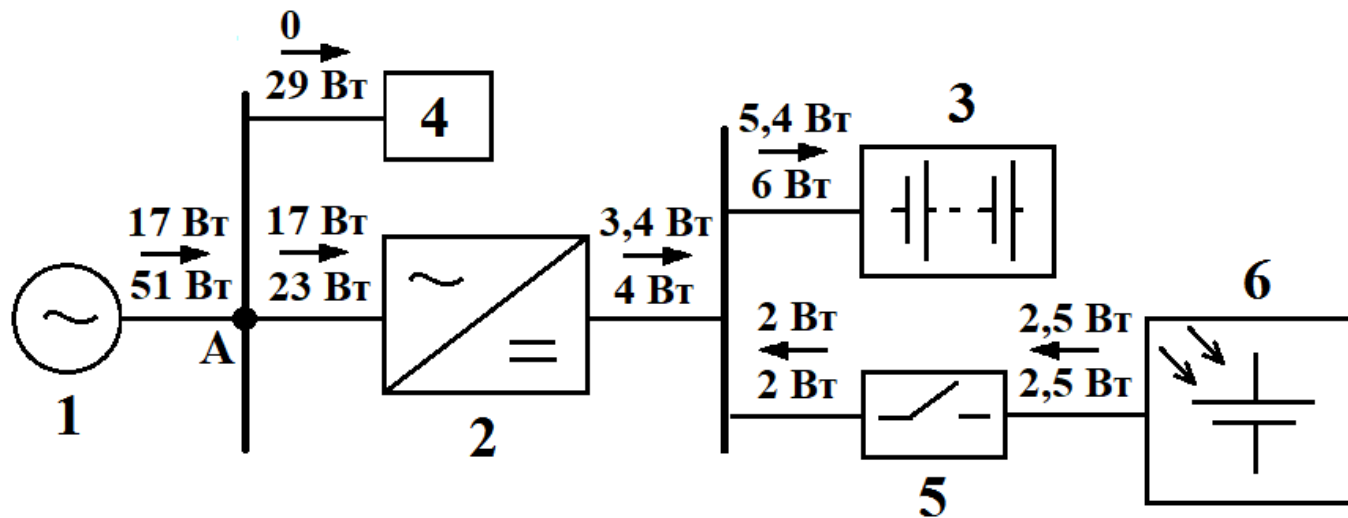
На рисунке красным выделен феррорезонансный контур.

Перетоки мощности в системе электроснабжения энергорайона с объектом распределенной генерации на основе ВИЭ

Для исследования перетоков мощности в системе электроснабжения с объектами РГ была использована электротехническая система с фотоэлектрической установкой:

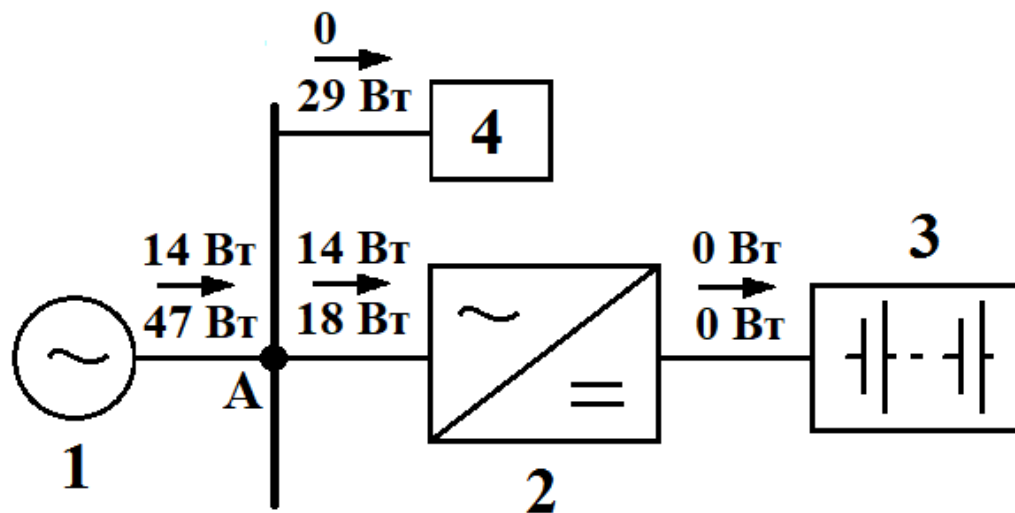


Однолинейная схема замещения ЭТС с ФЭУ



$\varphi = -81,9^\circ$	$\cos\varphi = 0,14$
$\varphi = -67^\circ$	$\cos\varphi = 0,39$

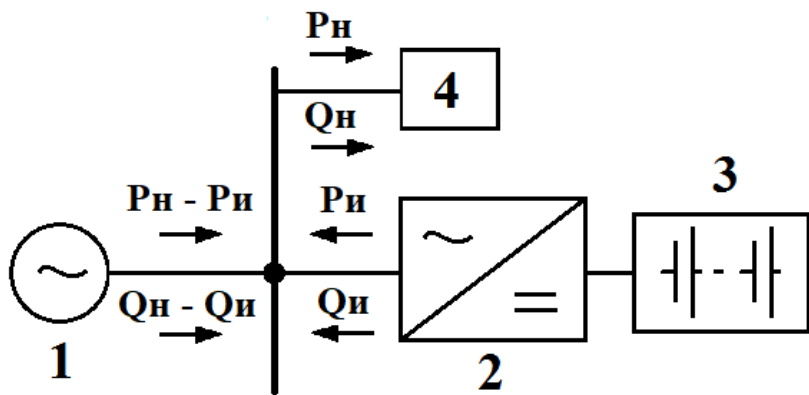
Однолинейная схема замещения ЭТС с ФЭУ:
 фотоэлектрическая батарея отключена



$\varphi = -83^\circ$	$\cos\varphi = 0,12$
$\varphi = -68,3^\circ$	$\cos\varphi = 0,37$

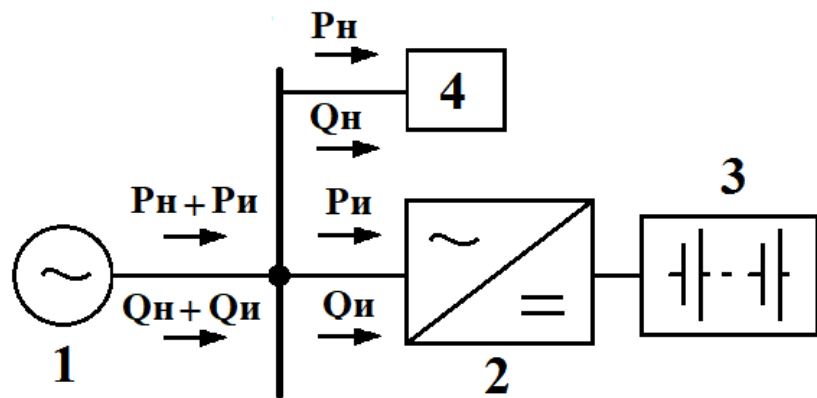
По результатам исследований отмечено низкое значение коэффициента мощности в точке подключения инвертора к внешней сети. Предложено следующее обоснование полученных результатов:

1. Однолинейная схема замещения ЭТС с ФЭУ при питании нагрузки от АКБ через инвертор и от сети:



$$\cos \varphi = \frac{P_H - P_I}{\sqrt{(P_H - P_I)^2 + (Q_H - Q_I)^2}}$$

2. Однолинейная схема замещения ЭТС с ФЭУ при питании нагрузки от сети и заряде АКБ через инвертор от сети:



$$\cos \varphi = \frac{P_H + P_I}{\sqrt{(P_H + P_I)^2 + (Q_H + Q_I)^2}}$$

Выводы:

1. Разработаны компьютерные модели изолированных или находящейся в островном режиме работы систем электроснабжения с распределенными источниками энергии. В моделях выполнена детализация нагрузки и основных элементов электросистем.

2. Разработана методика управления изолированными или находящимися в островном режиме работы системами электроснабжения с распределенными источниками энергии. Методика управления апробирована при помощи компьютерных моделей. Результаты моделирования указывают на удовлетворительную работу методики управления.

3. Разработана методика управления изолированными или находящейся в островном режиме работы системами электроснабжения с распределенными источниками энергии, позволяющая уменьшить потери мощности при электропередаче. Методика апробирована на примере промышленного энергорайона города. Результаты расчета показали, что годовая финансовая прибыль от использования методики составляет 1,5 млн. руб. Срок окупаемости оборудования, необходимого для реализации методики составляет 10 месяцев.

Выводы:

4. Рассмотрены схемно-режимные условия возникновения феррорезонанса в системе электроснабжения КВ-радиоцентра с объектом РГ. По результатам исследований можно заключить, что при распределенной генерации известные в системе централизованного электроснабжения схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов претерпевают изменения, а также возможно формирование новых феррорезонансных колебательных контуров.

5. По результатам исследований можно заключить, что в точке питания нагрузки электротехнической системы наблюдается низкое значение коэффициента мощности и возникновение перетока реактивной мощности в прилегающую сеть. Причиной низкого значения коэффициента мощности является уменьшение перетока активной мощности из прилегающей сети или увеличение перетока реактивной мощности в сеть или из сети.

Перспективы использования результатов исследований:

1. Повышение показателей качества электроэнергии в изолированных или находящихся в автономном режиме работы энергорайонах с распределенными источниками энергии.
2. Уменьшение потерь мощности при электропередаче в изолированных энергорайонах с распределенными источниками энергии.
3. Возможность расчета методами компьютерного моделирования параметров режима энергорайона на этапе проектирования или предстоящих структурных изменениях.
4. Оценка возможных рисков возникновения ФП на этапе проектирования системы электроснабжения с распределенными источниками энергии, организация и проведение в действующей системе соответствующих оперативно-технических мероприятий.
5. Исследование перетоков мощности в системах электроснабжения с объектами РГ на основе ВИЭ открывает возможность участия во вторичном регулировании параметров режима работы сети.

Планы дальнейших исследований и необходимые ресурсы:

1. Организация лаборатории «Исследование проблемных вопросов систем электроснабжения с распределенными источниками энергии» на базе ОмГТУ, бюджет 2 млн. руб.

На данный момент запущен в работу лабораторный стенд с фотоэлектрической установкой.

2. Формирование курса лекций по РГ, работа со студентами.

В печати учебное пособие «Электротехнические системы с фотоэлектрическими установками».

3. Разработка методики расчета феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенными источниками энергии.

4. Исследование перетоков мощности в системах электроснабжения с объектами РГ на основе ВИЭ.

5. Рассмотрение возможности электроснабжения потребителей с резкопеременным (толчковым) характером нагрузки в условиях распределенной генерации.

6. Участие в грантах РФФИ с проектами, направленными на решение проблемных вопросов систем электроснабжения с распределенными источниками энергии.