



Уральский  
федеральный  
университет



# Оптимальное размещение источников распределенной генерации в системах электроснабжения

- Чечушков Дмитрий Александрович

Научный руководитель:

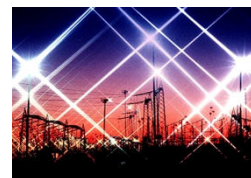
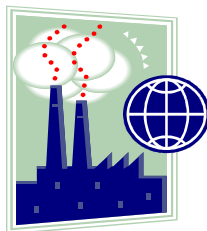
- **Черных Илья Викторович**  
д.т.н., зав. кафедрой ТВН УрФУ

Научный консультант:

- **Паниковская Татьяна Юрьевна**  
к.т.н., доцент

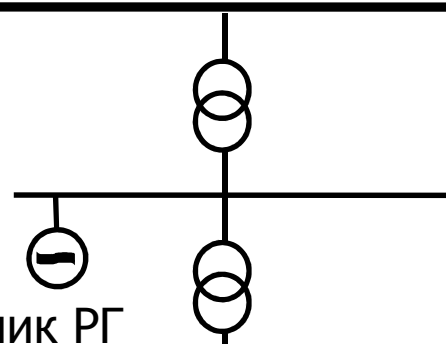
# ВВЕДЕНИЕ

Магистральные  
ЭС (220 кВ и  
выше)



Распределительные  
ЭС (110, 35 кВ)

10, 6 кВ



Сети ниже 1 кВ

Источник РГ



Источник РГ

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ



- Нетурбинные электростанций (газопоршневые установки у потребителей)
- Турбинные электростанций, кроме станций общего пользования (собственная генерация у потребителей)
- Турбинные электростанции общего пользования без АЭС (традиционная энергетика)

**Прирост генерирующей мощности у потребителей за 2010-2012 гг. составил 36 % от прироста мощности традиционной энергетики**



*\*по данным Росстата*

### Прирост установленной мощности ТЭС

	Прирост за 2010-2012 гг., ГВт
Малая энергетика (нетурбинные электростанции)	1,47
Крупные электростанции промпредприятий (турбинные электростанций, кроме станций общего пользования)	1,18
Большая энергетика (турбинные электростанции общего пользования)	7,4

## НОВИЗНА

- Показана эффективность применения источников РГ при аварийных режимах электрической сети, и выделен соответствующий критерий для оптимального размещения.
- Разработаны два математических метода оптимального размещения источников РГ.
- Разработана многокритериальная математическая оптимизационная модель выбора структуры системы с распределённой генерацией, с возможностью настройки целевой функции в зависимости от направленности задачи.
- Разработаны математические модели имитационного моделирования источников РГ.
- Решена задача выбора состава генерирующего оборудования и точки его подключения в распределительных сетях для снижения числа аварийных отключений электроснабжения.

# АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РГ

## Основные критерии

- Минимизация затрат на ввод и/или эксплуатацию.
- Максимизация прибыли.
- Минимальный срок окупаемости.
- Минимизация потерь мощности и электрической энергии.
- Минимизация отклонения напряжения.
- Отсутствие критериев связанных с влиянием источников РГ на аварийные режимы электрических сетей.

## ПРЕДЛАГАЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РГ

### 1. Инвестиционный – индекс рентабельности

$$PI = \sum_{t=1}^N \frac{NCF_t}{I} = \frac{1}{I} \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

PI > 1 — проект следует принять  
PI < 1 — отвергнуть  
PI = 1 — самоокупаемость

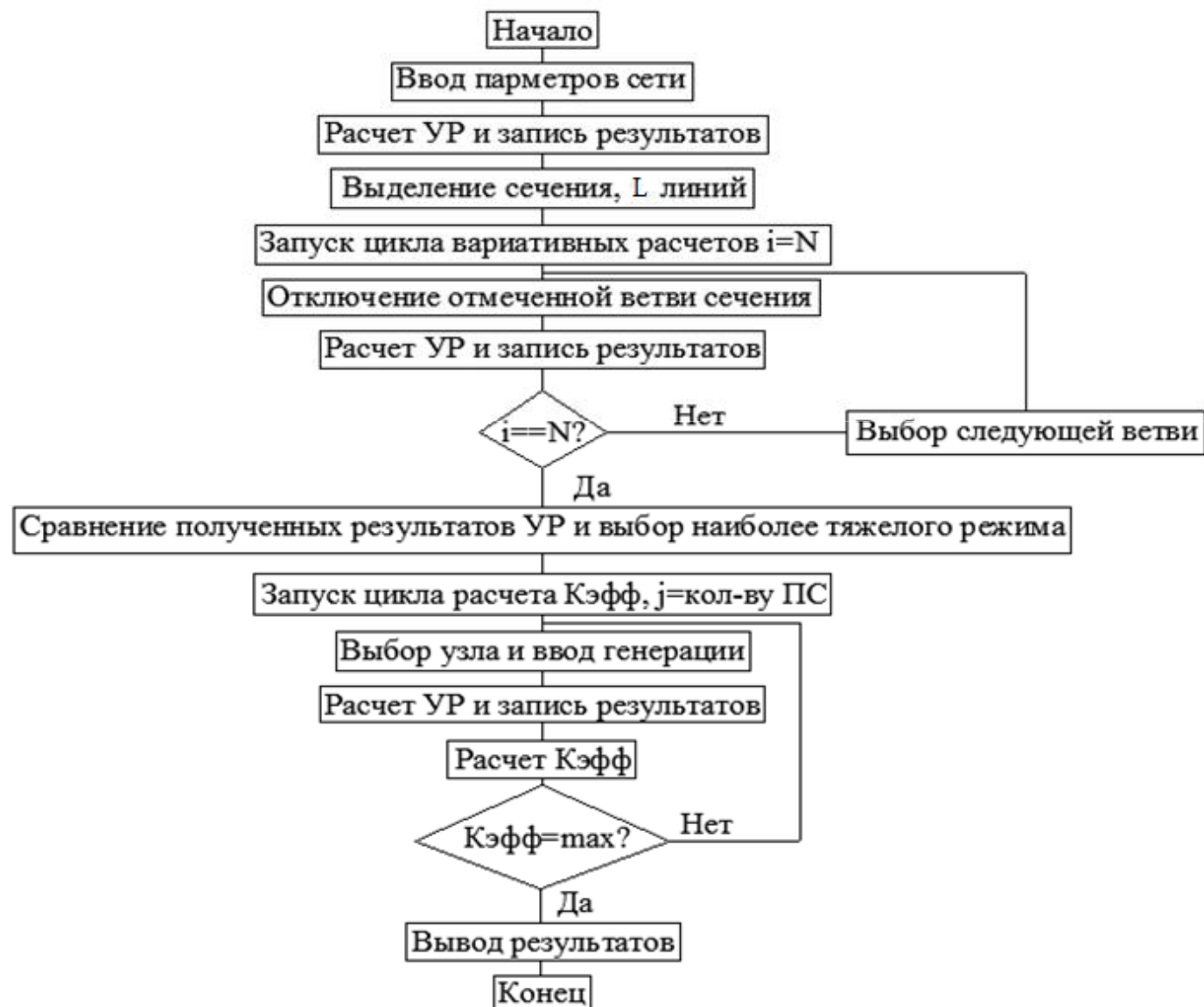
### 2. Отклонение установившегося напряжения

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{факт}}}{U_{\text{ном}}}$$

### 3. Критерий эффективности работы источников РГ в аварийных режимах систем электроснабжения

$$K_{\text{эфф}ij} = \frac{\Delta P_{\text{РГ}ij}}{\Delta P_{\text{сеч.}ij}}$$

## ПЕРВЫЙ МЕТОД: Этап I

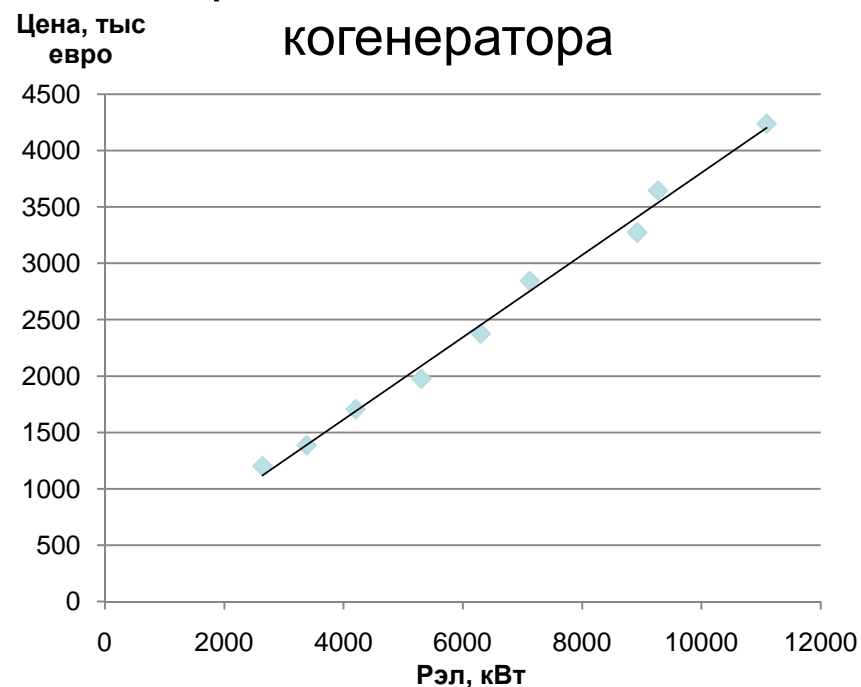


## ПЕРВЫЙ МЕТОД: Этап II

$$F_1 = \frac{1}{PI} = P \frac{\sum K_i}{\sum_t (C_i) \times (1 + \alpha)^{-t}},$$

### Аппроксимация стоимости когенератора

Капитальные затраты (K)		Эксплуатационные затраты (C)	
Составляющая затрат	Обо знач ение	Составляющая затрат	Обо знач ение
Приобретение и установка оборудования (блоков когенераторов)	K1	Потери электроэнергии в сети	C1
Строительная часть : монтаж блоков и систем «под ключ»	K2	Топливо	C2
Проектные работы	K3	Покупка электроэнергии от сети	C3
Ячейки РУ	K4	Угар масла	C4
Строительство топливной инфраструктуры	K5	Замена масла	C5
		Покупка тепловой энергии от сети	C6
Затраты на покупку труб	K6	Обслуживание станции	C7
Строительство трубопровода ГВС	K7	Ремонтные работы	C8



$$K_1 = a_1 + a_2 \cdot P_{\Gamma}$$

\*  $a_1$  и  $a_2$  — коэффициенты линейной аппроксимации



## ВТОРОЙ МЕТОД

### Многокритериальная взвешенная функция

- 1. Инвестиционная составляющая  $\frac{1}{PI}$

$$F_1 = fmin[P \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5}{\sum_t (D_1 + D_2 + D_3 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 - C_5)^t}]$$

- 2. Снижение отклонения установившегося напряжения

$$F_2 = fmin(\Delta U = \frac{U_{ном} - U_{факт}}{U_{ном}})$$

- 3. Эффективность работы РГ в аварийных режимах

$$F_3 = fmin(k_{эфф})^{-1}$$

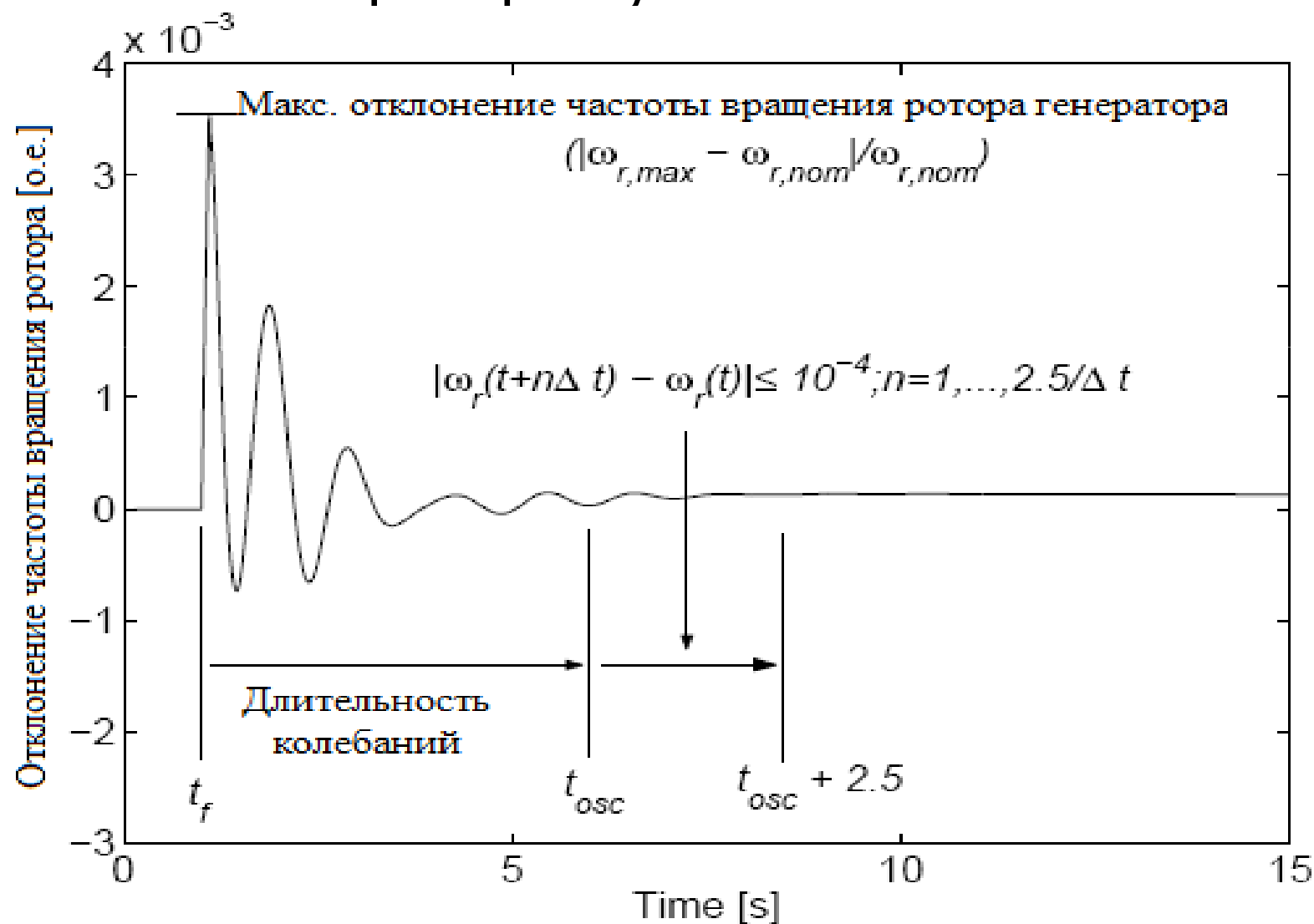
Общий вид целевой функции

$$F_i(P) = \beta_1 F_1^i(P) + \beta_2 F_2^i(P) + \beta_3 F_3^i(P)$$

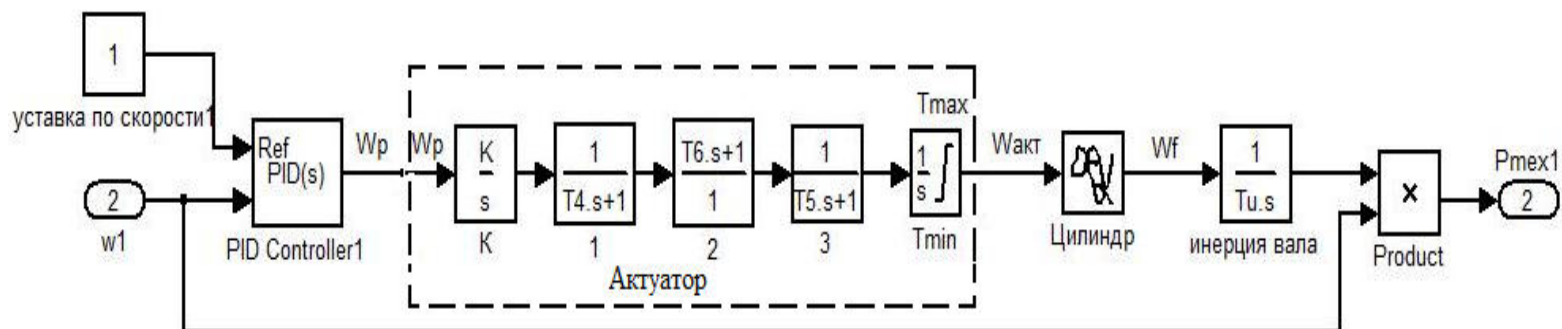
$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$$

# ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ИСТОЧНИКОВ РГ

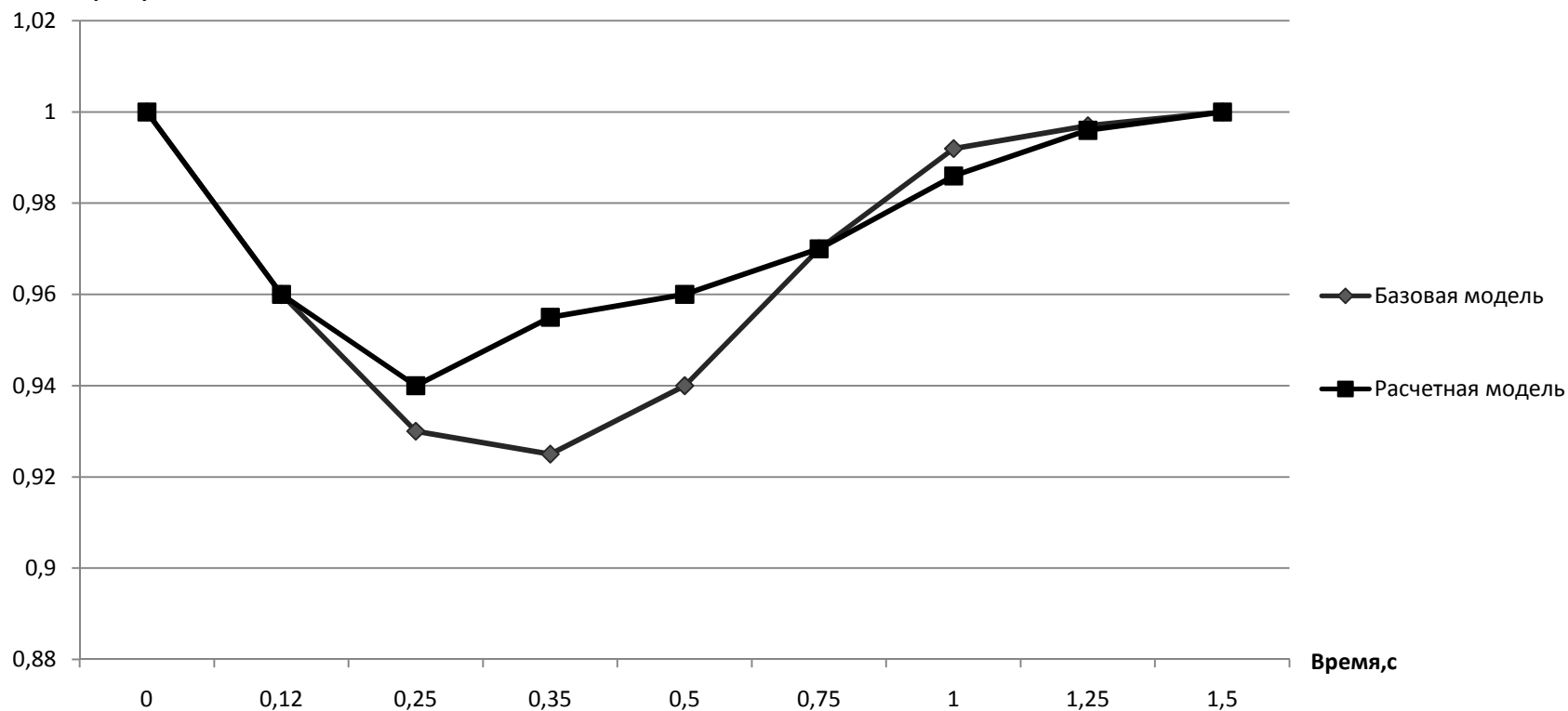
## Критерий устойчивости



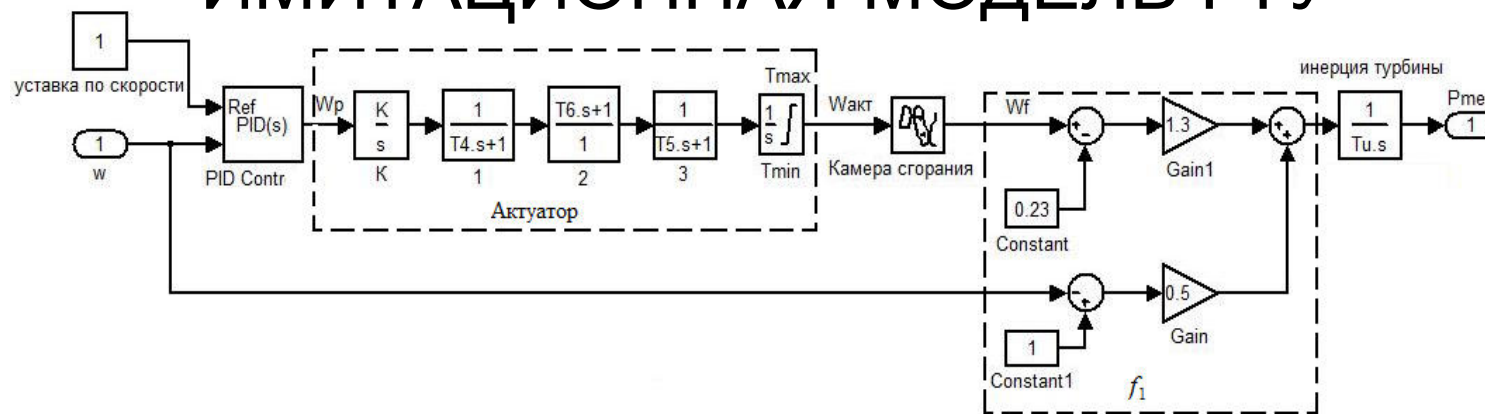
# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВС



Частота вращения ротора  
генератора, о.е.

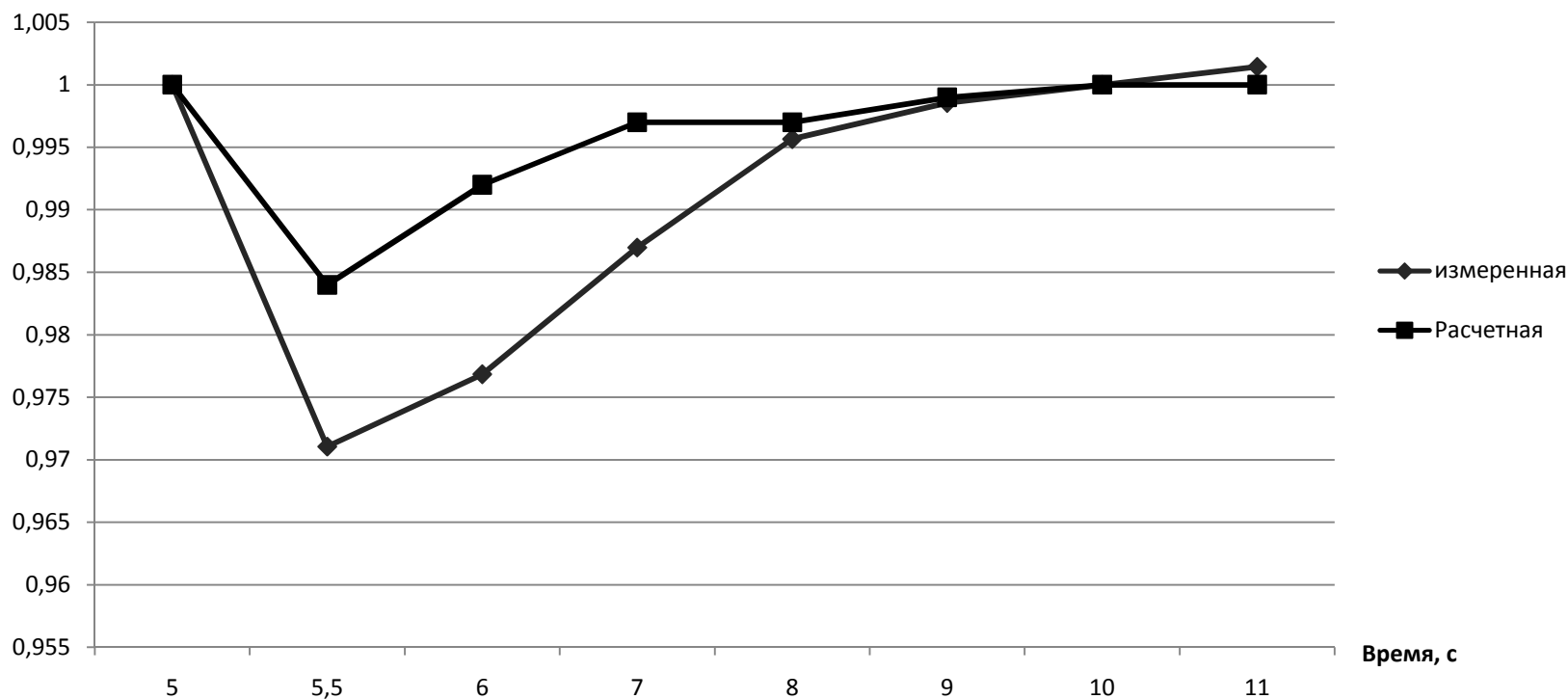


# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГТУ

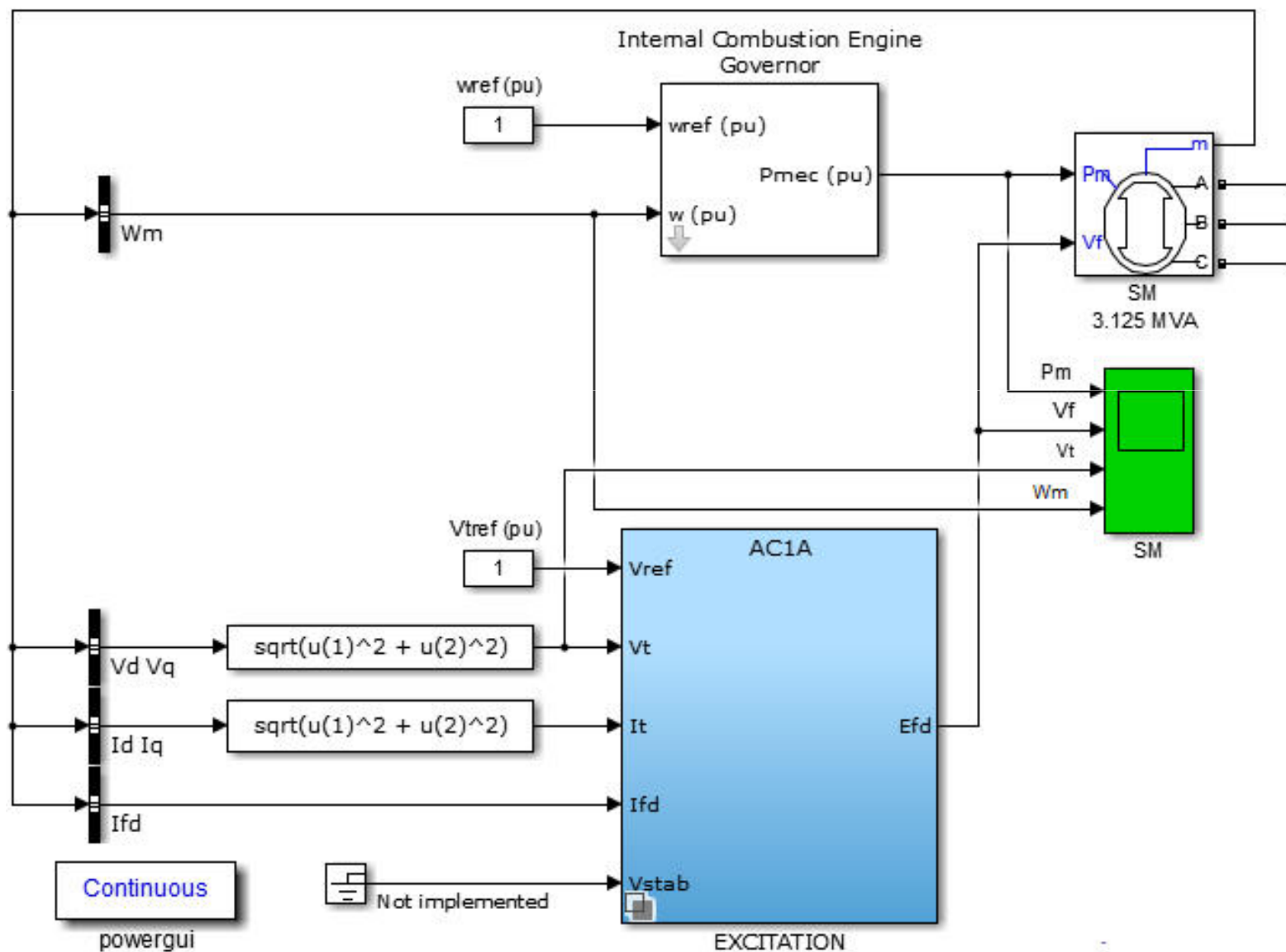


$$f_1 = 1,3 \cdot (W_{p.t.} - 0,23) + 0,5 \cdot (1 - N)$$

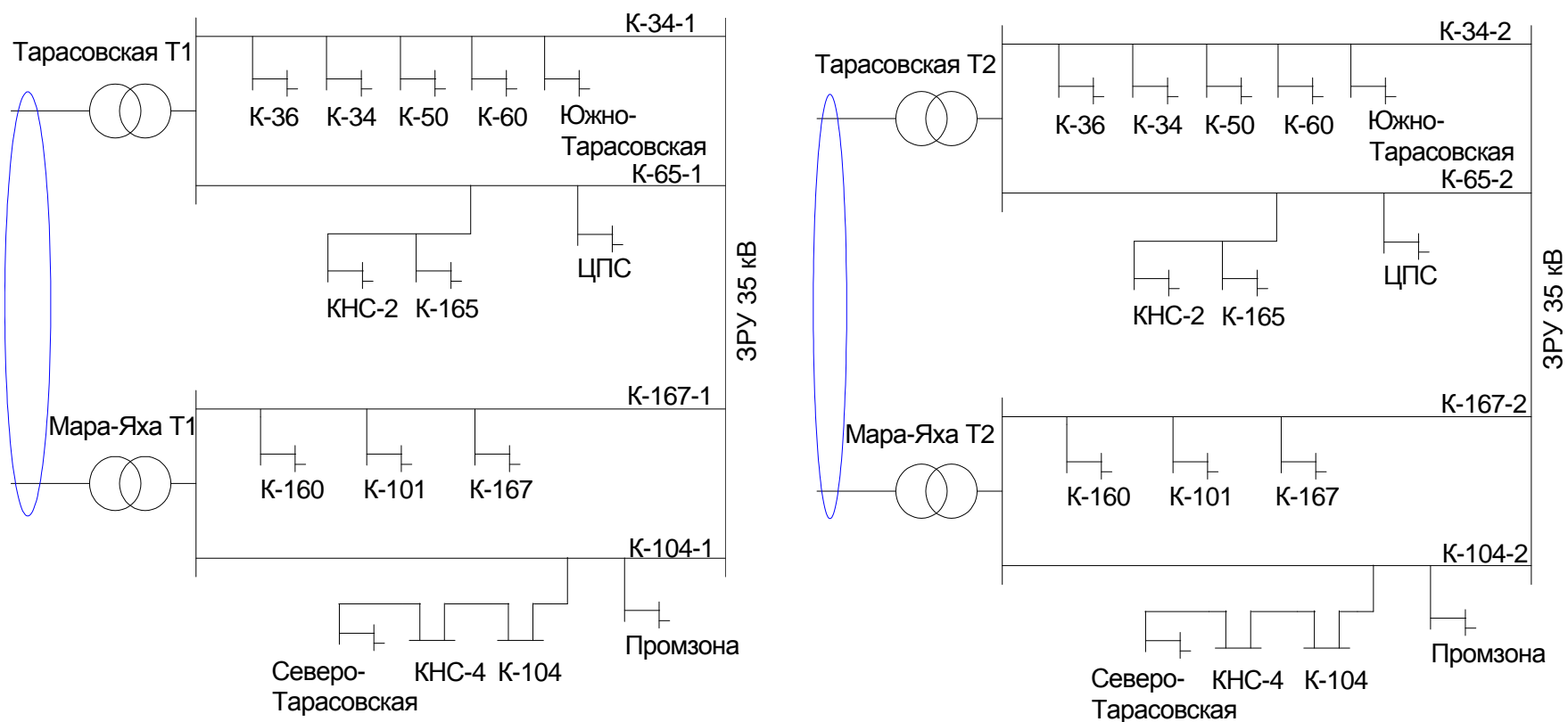
Частота вращения ротора  
генератора, о.е.



# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВС В SIMULINK



# ТЕСТОВАЯ СЕТЬ



\* в качестве источников электрической энергии рассматривается линейка газопоршневых когенераторов фирмы Warstilla, мощностью 2640, 3380, 5300, 7120, 8920, 9270, 11090 кВт.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

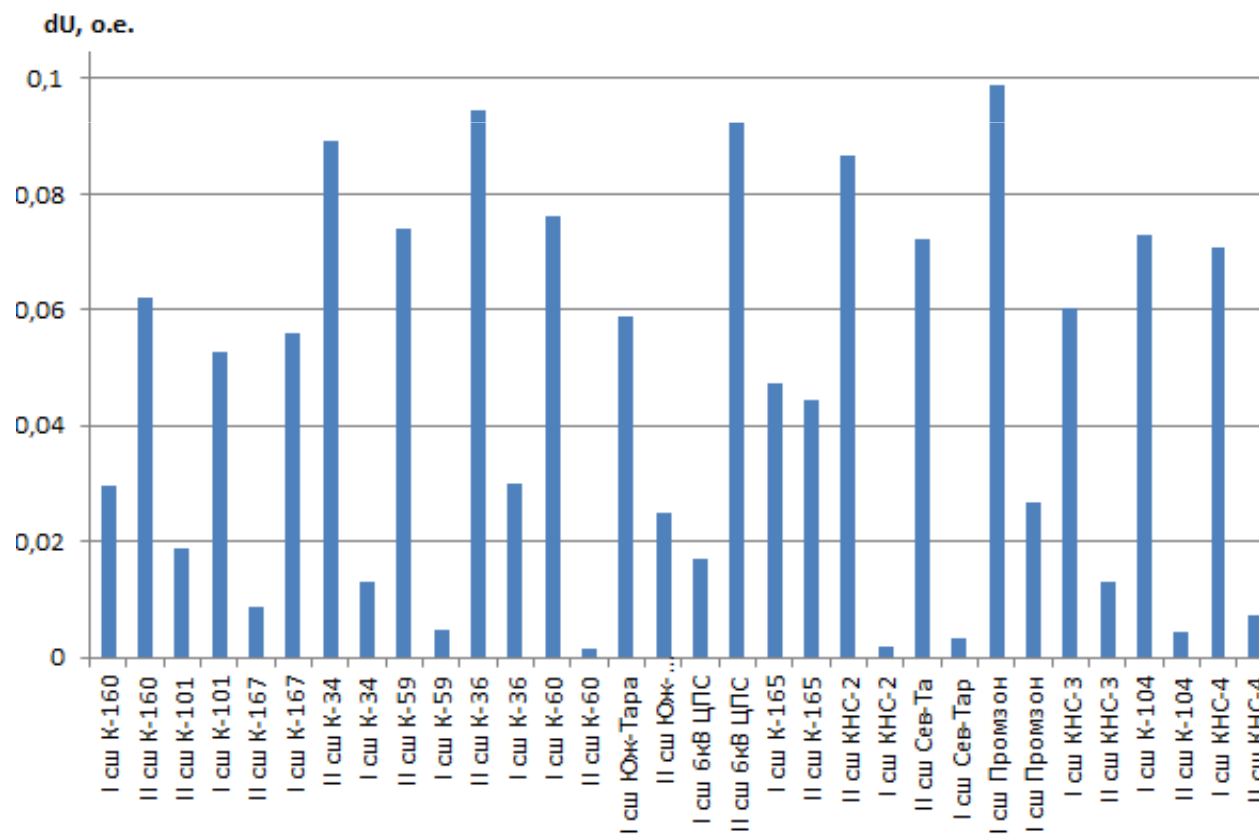
## Первый метод

Таблица 1 – результат расчета  $K_{эфф}$

Аварийная схема	Станция	$K_{эфф}$	Примечание
Тарасовская Т1	II сш Юж. Тарасовск.	1,011	Загрузка 6, МВт

Таблица 2 – результат расчета  
инвестиционного критерия

Мощность РГ, кВт	Капитальные затраты, тыс. руб.	Денежный поток, тыс. руб.	Значение PI
2х3380	341737	385354,4	0,886



# РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

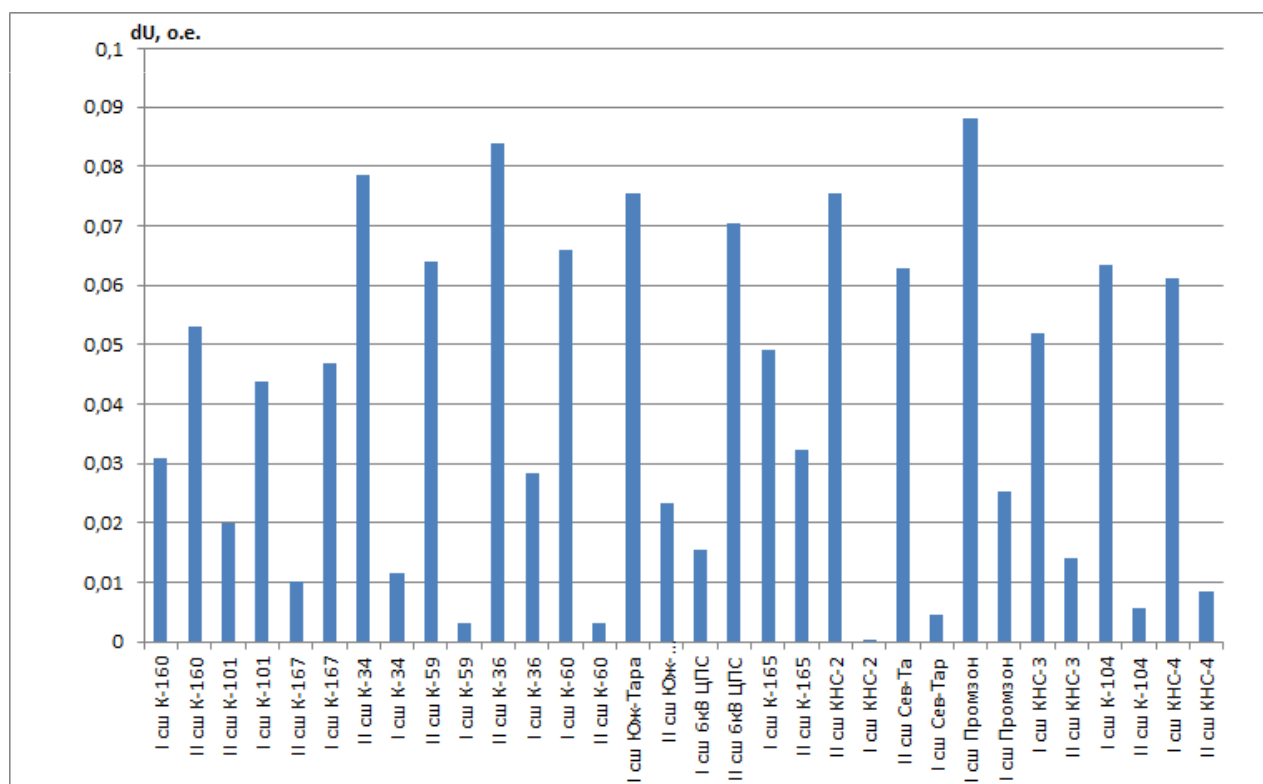
## Второй метод

Таблица 3 – набор весовых коэффициентов (ВК)

№ набора ВК	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,05	0,05	0,9
2	0,34	0,33	0,33
3	0,85	0,05	0,1

Таблица 4 – значения ЦФ и результаты для многокритериального метода

Набор ВК	Значение ЦФ	Узел	Состав оборудования
1	0,939	Юж. Тар.	2х3380(кВт)
2	0,65	ЦПС	7120(кВт)
3	0,824	ЦПС	7120(кВт)





# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

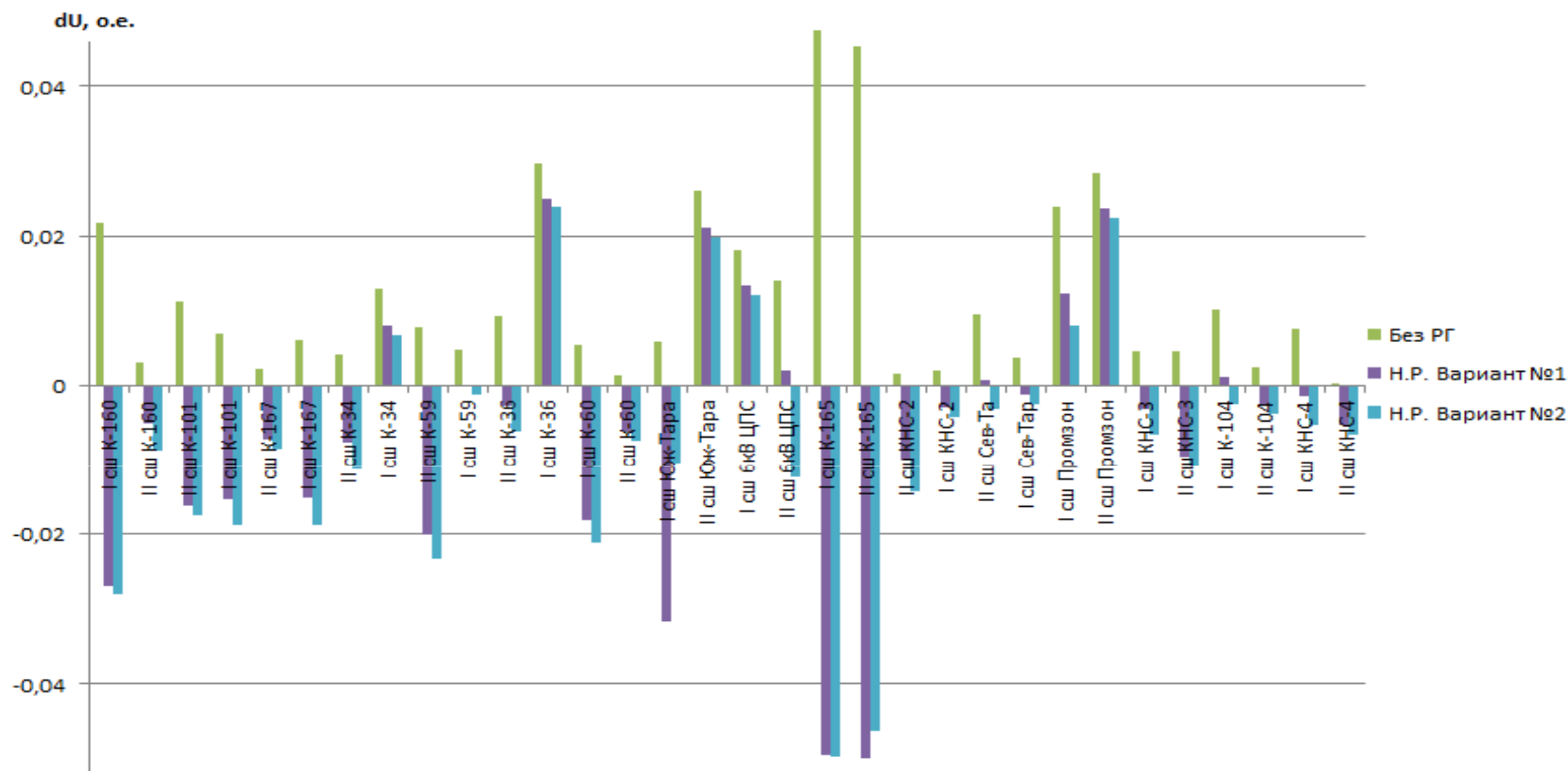


Таблица 5 – Потери активной мощности

Вариант	dP Тарасовское НМР, МВт	dP Ноябрьские сети, МВт
№1	0,658	5,19
№2	0,656	5,17
Без РГ	0,659	5,21

Таблица 6 – Время расчета

Метод	Время расчета, мин.
№1	~2
№2	14 - 17

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ИСТОЧНИКОВ РГ

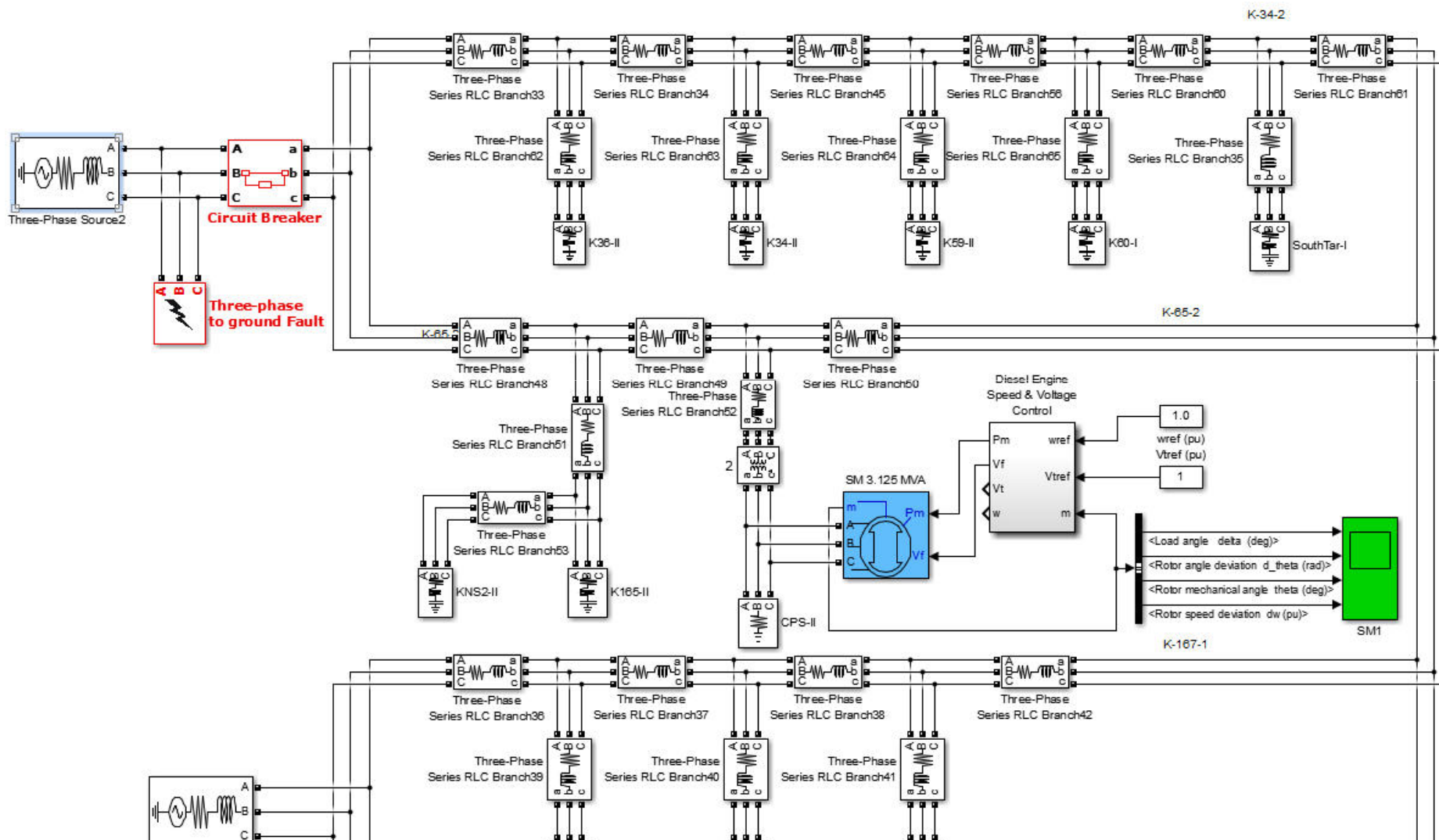


Диаграмма изменения скорости вращения ротора генератора 3380 кВт Южно тарасовская 0,4с. (левый); 7120 кВт ЦПС 0,3с.(правый)

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ИСТОЧНИКОВ РГ

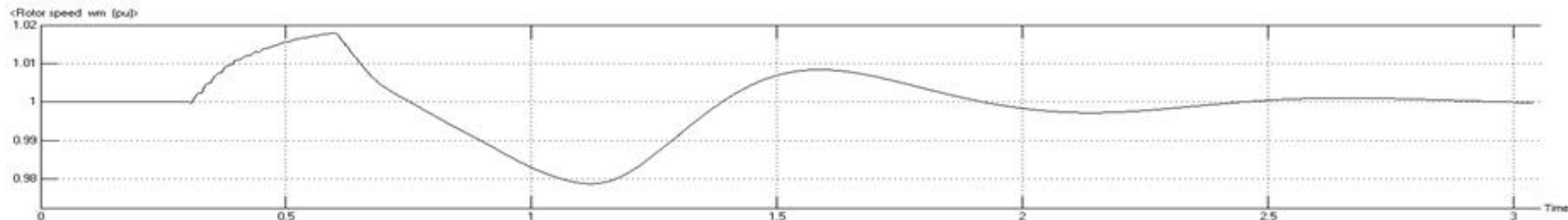


Диаграмма изменения скорости вращения ротора генератора 3380 кВт Южно-Тарасовская 0,3с.

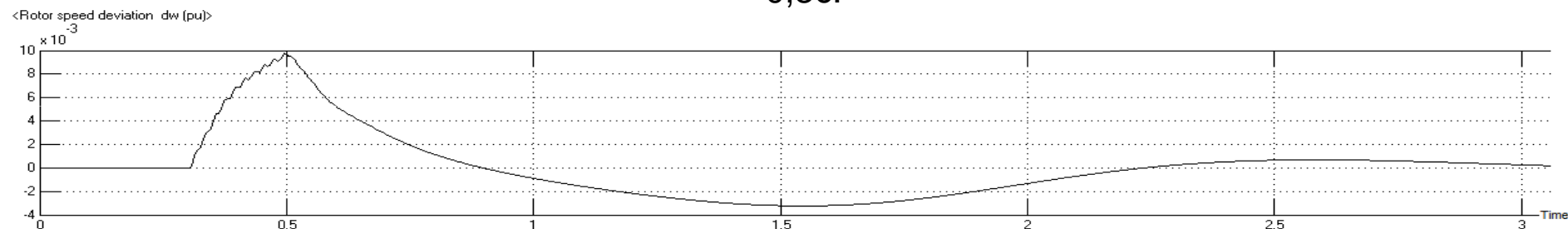


Диаграмма изменения скорости вращения ротора генератора 7120 кВт ЦПС 0,2с.

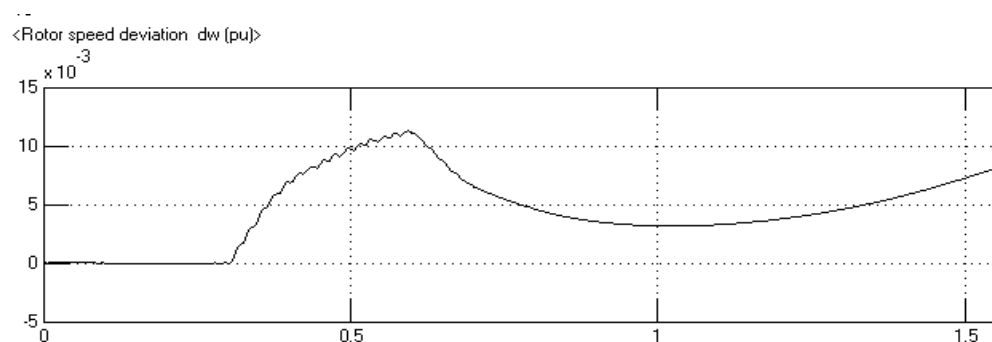
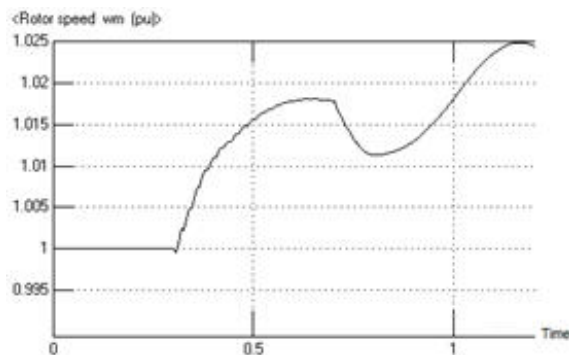


Диаграмма изменения скорости вращения ротора генератора 3380 кВт Южно тарасовская 0,4с. (левый); 7120 кВт ЦПС 0,3с.(правый)

## ВЫВОДЫ

1. В работе показано, что за счет применения источников РГ возможно снизить число аварийных отключений электроснабжения потребителей. *Выделен соответствующий критерий эффективности работы малых распределенных генераторов при возникновении некоторых аварийных ситуаций.*
2. Разработаны два метода оптимального размещения источников распределенной генерации направленных на снижение числа аварийных отключений электроснабжения потребителей. Данные методы, так же позволяют производить оптимизацию выбора числа, мощности и точек подключения распределённых генераторов.
3. Разработаны математические модели имитации работы газотурбинной установки и двигателя внутреннего сгорания используемых в качестве первичных двигателей в генерирующих установках. Продемонстрирована их адекватность, путем сравнения с численными и экспериментальными результатами.
4. Выполнена основная задача предложенных методик, *произведен выбор узла подключения и состава генерирующего оборудования для снижения числа аварийных отключений электроснабжения.* Это в свою очередь говорит о повышении надежности электроснабжения потребителей, в части внезапных отказов.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**