

ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»



# Многокритериальная оптимизация параметров СЭС периферийных районов крупных городов с применением глубоких вводов высокого напряжения

Доцент НИУ «МЭИ», к.т.н. Фахриева С.А.

# Актуальность работы

Количество электроприборов длительного пользования в домашних хозяйствах РФ

| Наименование электроприбора | Количество электроприборов, шт. на 100 семей, по годам |      |      |      |      |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|
|                             | 1995   | 2000 | 2005 | 2009 | 2018 |
| Телевизор                   | 134  | 124  | 138  | 160  | 173  |
| Персональный компьютер      | –  | 6    | 26   | 55   | 72   |
| Посудомоечная машина        | –  | –    | 1    | 3    | 10   |
| Микроволновая печь          | –  | –    | 25   | 51   | 65   |
| Кондиционер                 | –  | –    | 3    | 8    | 15   |

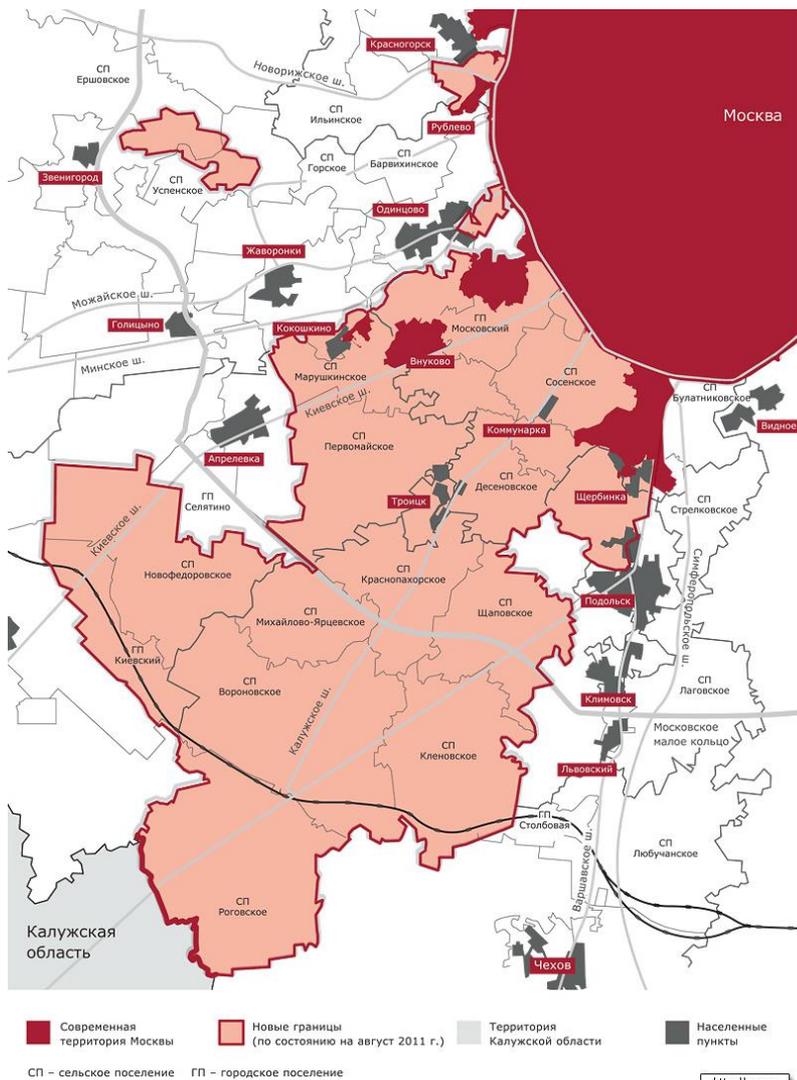
Поверхностная плотность нагрузки в г. Москва

| Годы  | 1990 | 2010   | 2022        |
|---|------|--------|-------------|
| Средняя по всей территории, МВт/км <sup>2</sup> | 7,3  | 9,5    | 11          |
| В центральных районах, МВт/км <sup>2</sup>      | 45   | 80-150 | 160 и более |

Согласно прогнозу электропотребление в Москве и МО к 2028 году может увеличиться до **124 млрд.кВт.ч**, электрическая нагрузка может составить **19,8 тыс.МВт**.

# Актуальность работы

## Развитие территории и численности г. Москва



| Годы | Площадь     | Население        |
|------|-------------|------------------|
| 1935 | 60 тыс. га  | 3,5 млн человек  |
| 1960 | 88 тыс. га  | 6 млн человек    |
| 2011 | 107 тыс. га | 11,5 млн человек |
| 2012 | 251 тыс. га | 12 млн человек   |
| 2024 | 256 тыс. га | 13 млн человек   |

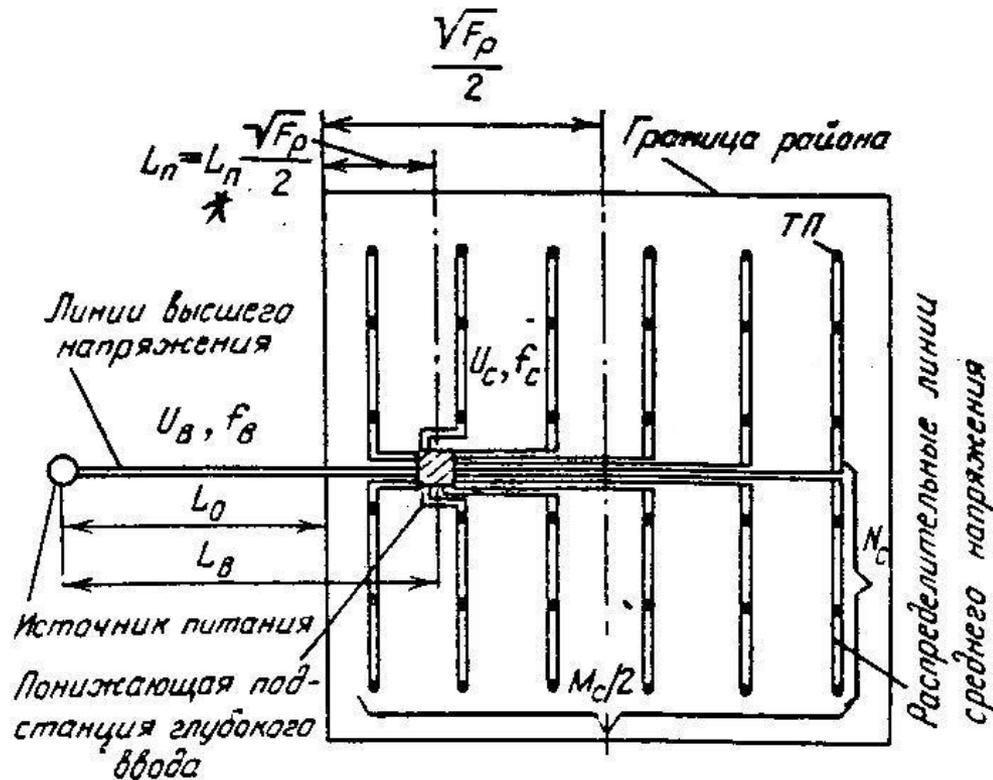
# Цели и задачи работы

**Цель:** Определение рациональных параметров системы электроснабжения периферийных районов современных крупных городов, выполняемой с применением глубоких вводов высшего напряжения

## Задачи:

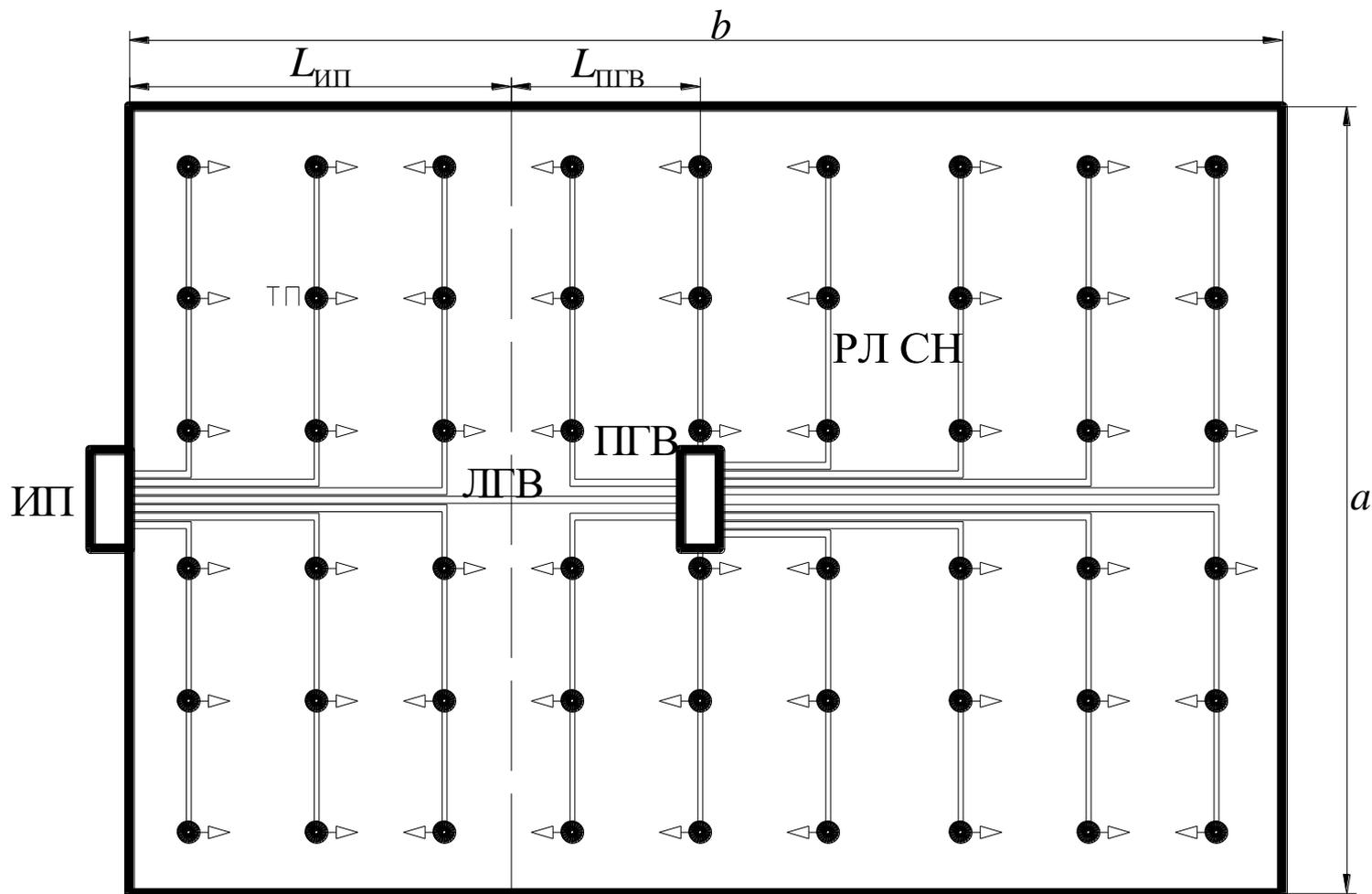
1. Формирование оригинальной топологической модели периферийного района крупного города и системы его электроснабжения с применением глубокого ввода с учетом современных тенденций развития городских территорий. Определение основных топологических характеристик модели.
2. Разработка математической модели системы электроснабжения периферийных районов крупных городов, описывающей критерии оптимизации основных параметров системы и учитывающей ее электротехнические, топологические и экономические характеристики.
3. Определение целесообразности сооружения и оптимальных параметров глубоких вводов высокого напряжения.

# Формирование топологической модели периферийного района города и системы его электроснабжения



Пример идеализированной топологической модели территории района города и принципиальной схемы его электроснабжения с применением глубокого ввода

# Формирование топологической модели периферийного района города и системы его электрооснабжения



# Определение топологических характеристик системы электроснабжения

**Суммарная длина распределительных линий среднего напряжения**

$$L_{\text{CH}_\Sigma} = L_{\text{CH}}^{\text{ИП}} + L_{\text{CH}}^{\text{ПГВ}}$$
$$L_{\text{CH}_\Sigma} = c_1 \cdot \frac{1}{L_{\text{ИП}}} + c_2 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{L_{\text{ИП}}} + c_3 \cdot L_{\text{ИП}} + c_4 \cdot L_{\text{ИП}} \cdot S_{\text{ПГВ}} +$$
$$+ c_5 \cdot (l-1)^2 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + c_5 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + c_6 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2}{L_{\text{ИП}}} + c_7 \cdot \frac{(F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3)^2}{L_{\text{ИП}}}$$

**Средняя длина магистрали среднего напряжения, отходящей от ИП**

$$l_{\text{CH}_{\text{ИП}}}^{\text{ср}} = c_8 \cdot \frac{1}{L_{\text{ИП}}} + c_9 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{L_{\text{ИП}}} + 0,5 \cdot L_{\text{ИП}}$$

**Средняя длина магистрали среднего напряжения, отходящей от ПГВ.**

$$l_{\text{CH}_{\text{ПГВ}}}^{\text{ср}} = c_8 \cdot \frac{1}{L_{\text{ИП}}} + c_9 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{L_{\text{ИП}}} + b_{10} \cdot (l-1)^2 \cdot \frac{L_{\text{ИП}} \cdot S_{\text{ПГВ}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + b_{10} \cdot \frac{L_{\text{ИП}} \cdot S_{\text{ПГВ}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3}$$

$c_i, b_i$  – расчетные коэффициенты

# Оптимизируемые параметры системы электроснабжения периферийных районов крупных городов с применением ГВ

1. Расстояние от ИП до границы участка, питающегося от ПГВ:

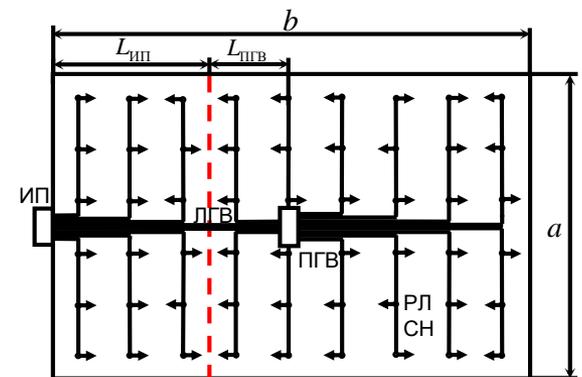
$$L_{\text{ИП}\%} = \frac{L_{\text{ИП}} \cdot 100\%}{b}$$

2. Отдаленность ПГВ от границы участка района, питающегося от ПГВ:

$$L_{\text{ПГВ}\%} = \frac{L_{\text{ПГВ}} \cdot 100\%}{b - L_{\text{ИП}}}$$

3. Установленная мощность ПГВ:

$$S_{\text{ПГВ}} = \frac{F_p \cdot \sigma - a \cdot L_{\text{ИП}} \cdot \sigma}{k_3}$$



# Технико-экономическая модель

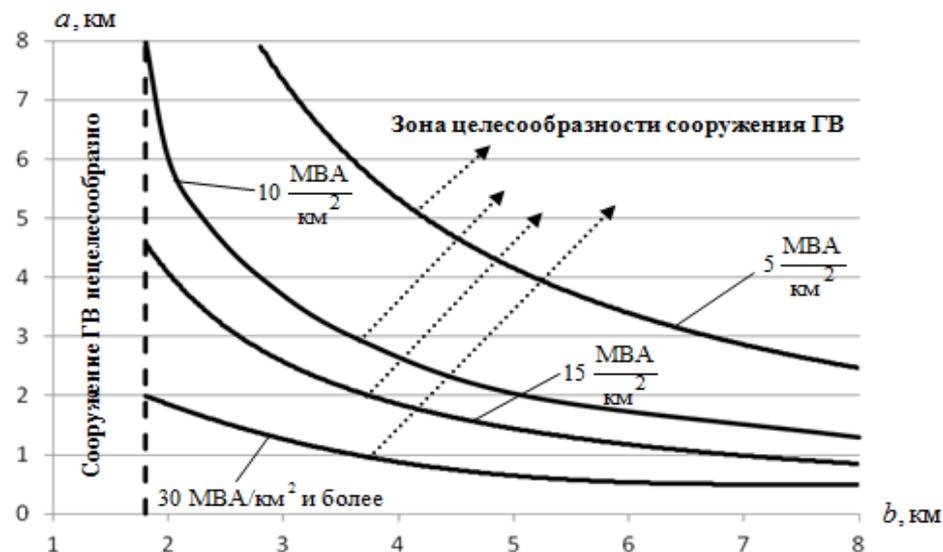
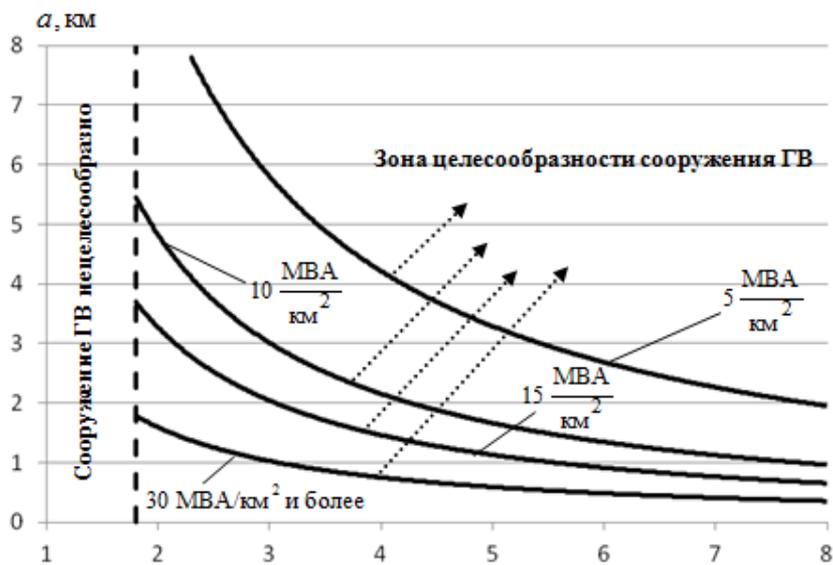
$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{яч}}^{\text{ИП}} + Z_{\text{ЛГВ}} + Z_{\text{ПГВ}} + Z_{\text{СН}}^{\text{ИП}} + Z_{\text{СН}}^{\text{ПГВ}} = C_1 \cdot K_{\text{КЛ}\Sigma} + C_2 \cdot K_{\text{ПС}\Sigma} + B_{\text{экв}} \cdot I_{\Delta \Sigma}$$

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} = & C_1 \cdot [A_4 \cdot L_{\text{ИП}} + a_6 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot l + a_7 \cdot F_{\text{ЛГВ}} \cdot L_{\text{ИП}} + a_8 \cdot F_{\text{ЛГВ}} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + \\ & + a_9 \cdot U_{\text{ВН}} \cdot L_{\text{ИП}} + a_{10} \cdot U_{\text{ВН}} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + a_{11} \cdot \frac{1}{L_{\text{ИП}}} + a_{12} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{L_{\text{ИП}}} + a_{14} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot S_{\text{ПГВ}} + a_{15} \cdot \frac{(F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3)^2}{L_{\text{ИП}}} + \\ & + a_{16} \cdot (l-1)^2 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + a_{17} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + a_{18} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2}{L_{\text{ИП}}} + a_{19} \cdot \frac{F_{\text{ЛСН}}}{L_{\text{ИП}}} + a_{20} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}} \cdot F_{\text{ЛСН}}}{L_{\text{ИП}}} + a_{21} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot L_{\text{ИП}} + \\ & + a_{22} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot S_{\text{ПГВ}} + a_{23} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot \frac{(F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3)^2}{L_{\text{ИП}}} + a_{24} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot (l-1)^2 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + \\ & + a_{25} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + a_{26} \cdot F_{\text{ЛСН}} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2}{L_{\text{ИП}}}] + \\ & + C_2 \cdot [A_1 + A_2 \cdot U_{\text{ВН}} + A_3 \cdot S_{\text{ПГВ}}] + B_{\text{экв}} \cdot [a_{27} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}}{L_{\text{ИП}} \cdot F_{\text{ЛСН}}} + a_{28} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2}{L_{\text{ИП}} \cdot F_{\text{ЛСН}}} + a_{29} \cdot \frac{1}{F_{\text{ЛСН}}} \cdot (l-1)^2 \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + \\ & + a_{29} \cdot \frac{1}{F_{\text{ЛСН}}} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3} + a_{31} \cdot \frac{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3}{L_{\text{ИП}} \cdot F_{\text{ЛСН}}} + a_{32} \cdot S_{\text{ПГВ}} \cdot \frac{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3}{L_{\text{ИП}} \cdot F_{\text{ЛСН}}} + a_{33} \cdot L_{\text{ИП}} \cdot \frac{F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3}{F_{\text{ЛСН}}} + \\ & + a_{34} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^2 \cdot L_{\text{ИП}}}{U_{\text{ВН}} \cdot F_{\text{ЛГВ}}} + a_{35} \cdot \frac{S_{\text{ПГВ}}^3 \cdot L_{\text{ИП}} \cdot l}{U_{\text{ВН}}^2 \cdot F_{\text{ЛГВ}} \cdot (F_p \cdot \sigma - S_{\text{ПГВ}} \cdot k_3)} + a_{36} + a_{37} \cdot S_{\text{ПГВ}} + a_{38} \cdot U_{\text{ВН}}] \end{aligned}$$

$a_i, b_i, c_i, A_i, C_i$  – расчетные коэффициенты (обобщенные константы)

# Исследование целесообразности сооружения ГВ на территории периферийного района крупного города

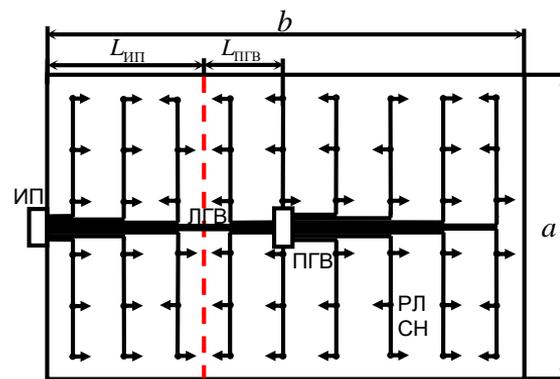
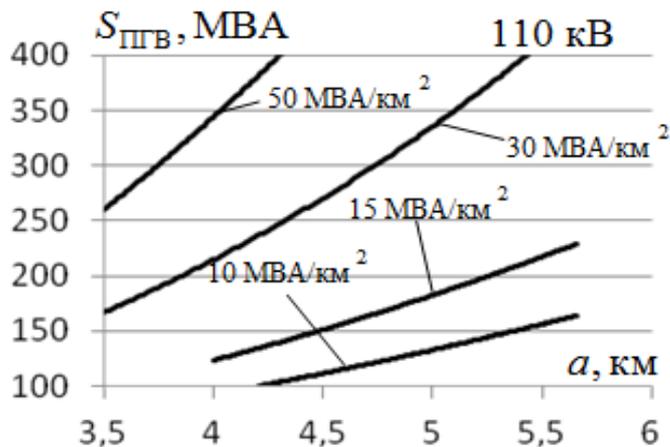
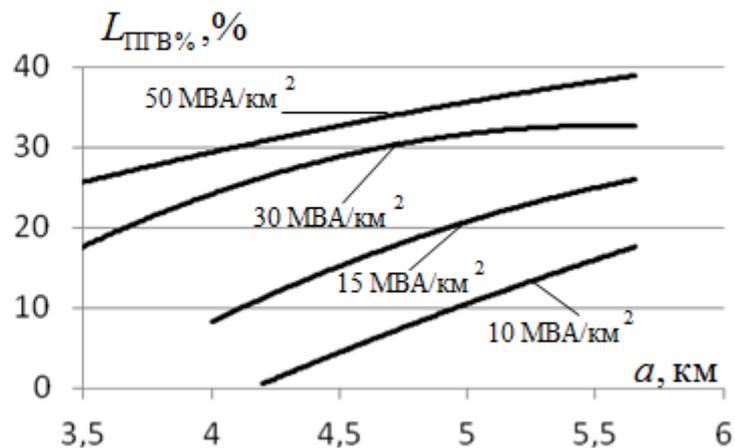
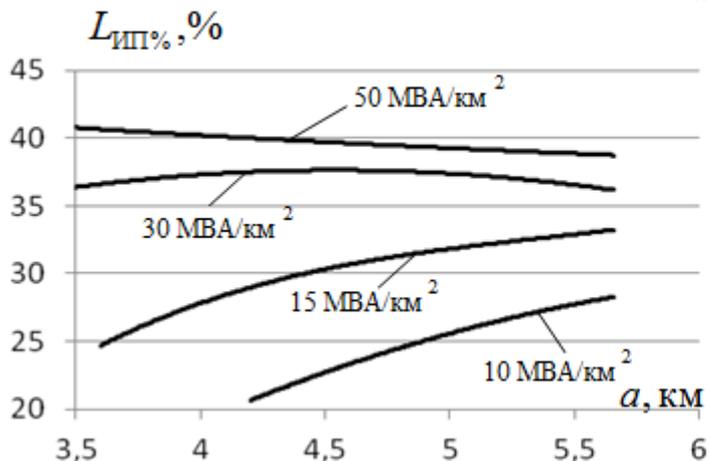
## Номограммы целесообразности сооружения ГВ



Номинальное напряжение ГВ: а) 110 кВ; б) 220 кВ

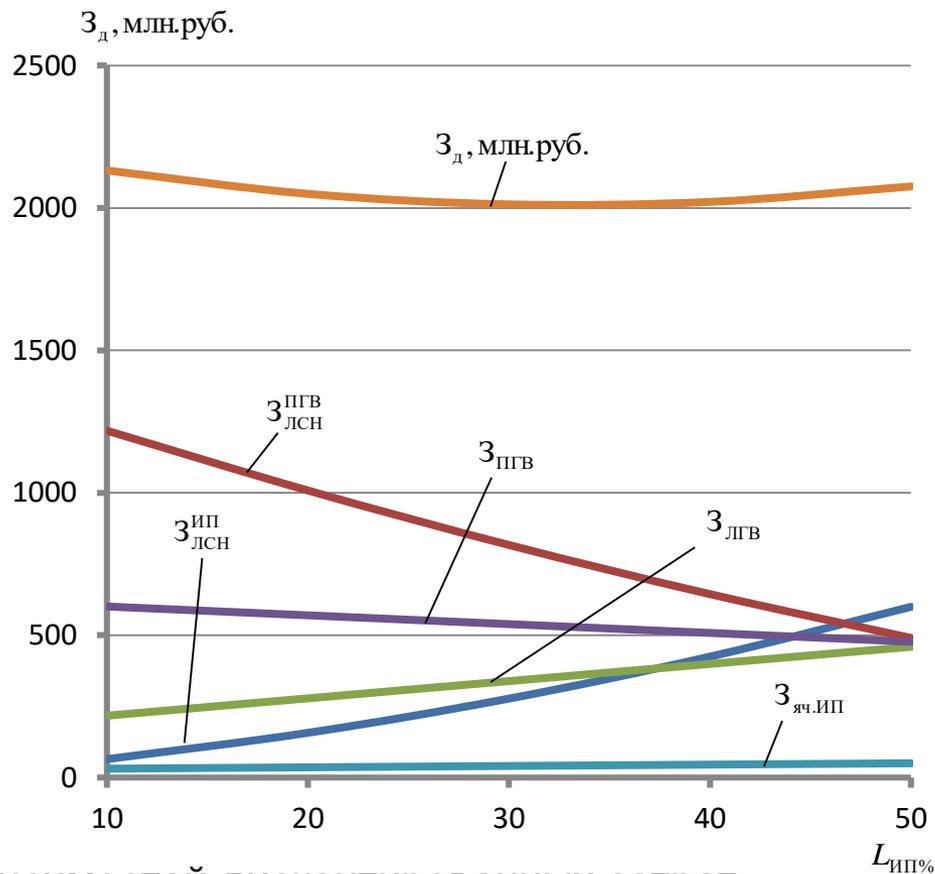
# Оптимизация параметров ГВ по критерию минимума дисконтированных затрат

$a:b=2:1$

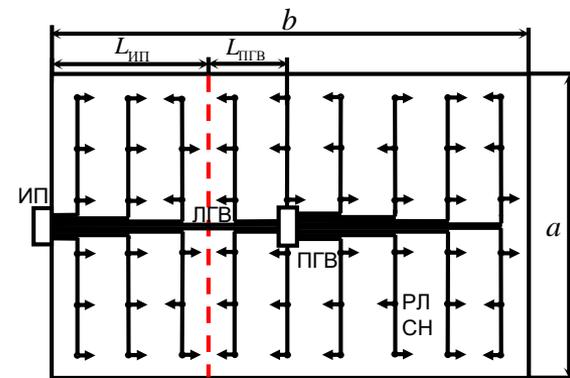


Номинальное напряжение ГВ 110 кВ

# Оптимизация параметров ГВ по критерию минимума дисконтированных затрат



Пример зависимостей дисконтированных затрат для района площадью 10 км<sup>2</sup> с поверхностной плотностью нагрузки 30 МВА/км<sup>2</sup> при соотношении сторон  $a:b=1:2$



# Многокритериальная постановка задачи

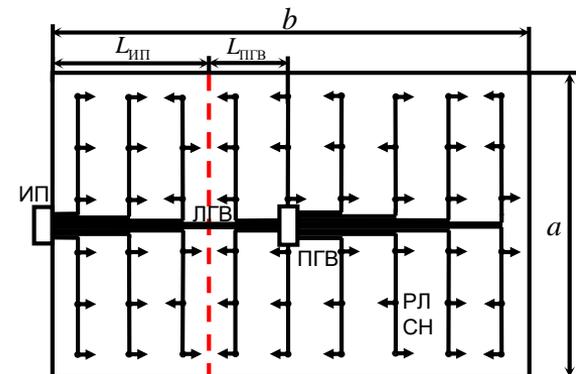
Система частных критериев :

- Минимум дисконтированных затрат ( $Z_{д\Sigma}$ );
- Минимум длины трасс кабельных линий СН ( $L_{СН\Sigma}$ ).

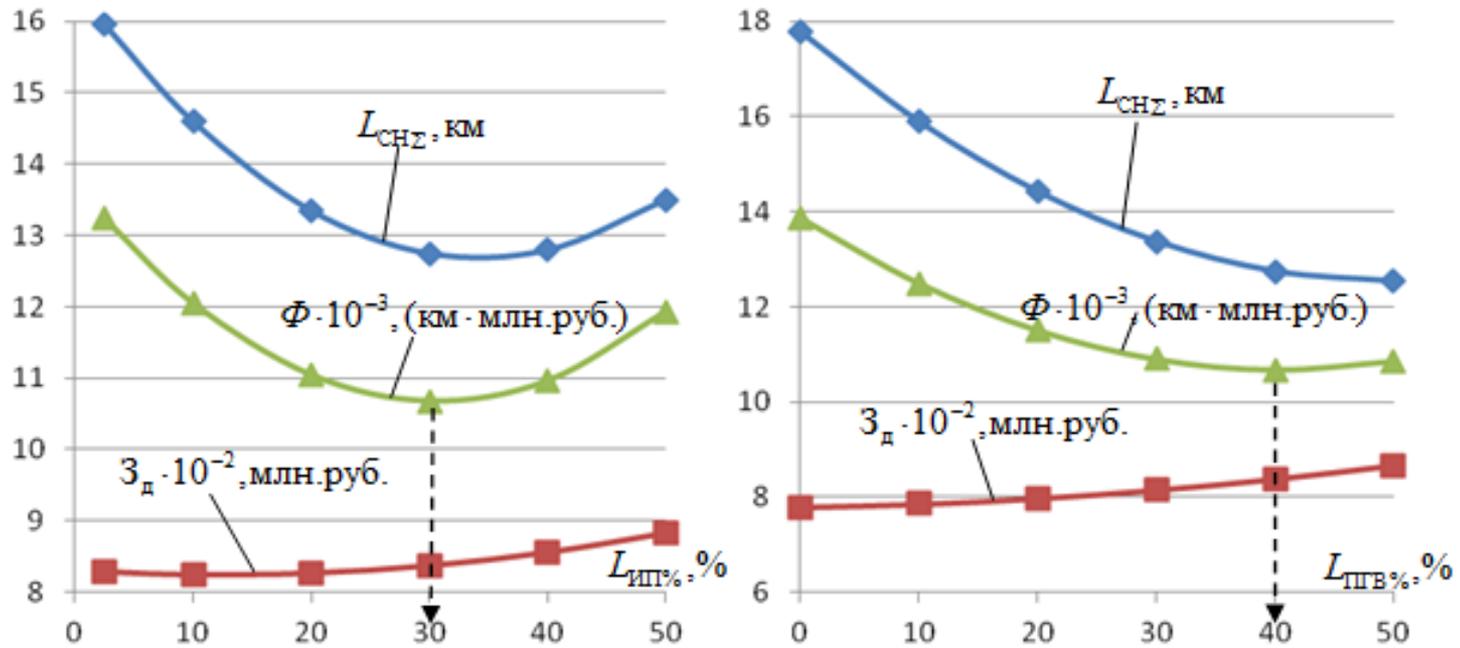
Метод свертки частных критериев

$$\Phi = \prod_{i=1}^n f_i \rightarrow \min$$

$$\Phi = L_{СН\Sigma} \cdot Z_{д\Sigma} \rightarrow \min$$



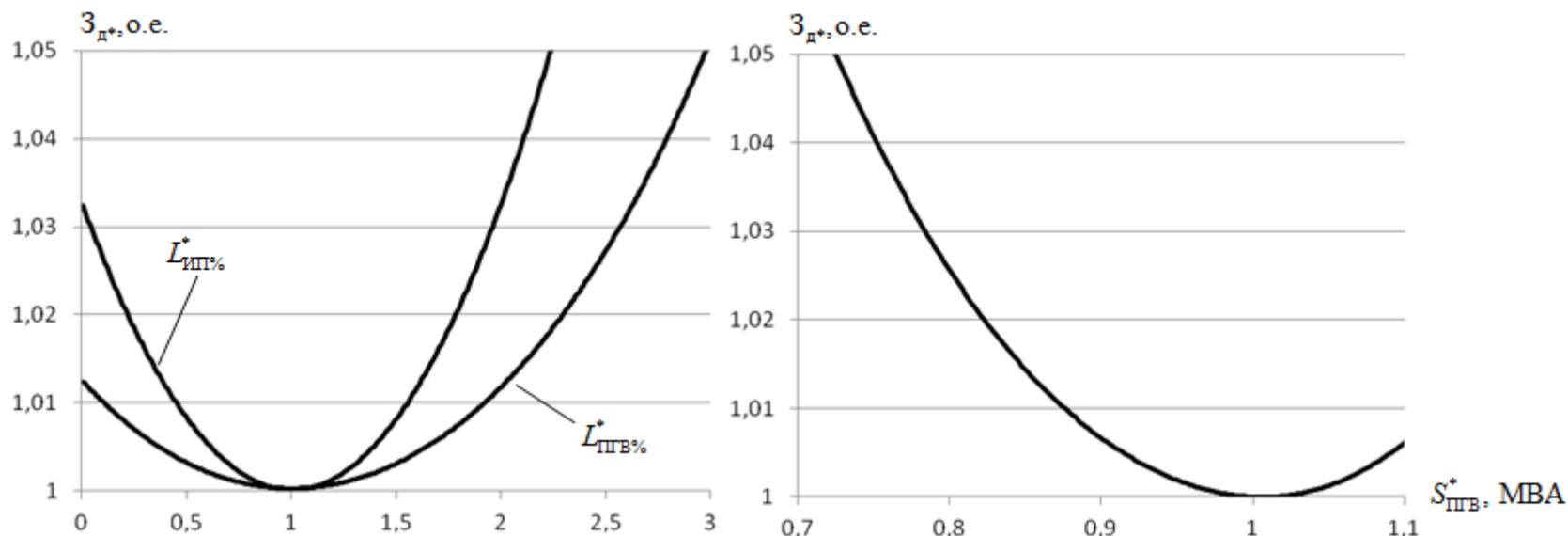
# Многокритериальная постановка задачи



Пример зависимостей дисконтированных затрат, суммарной длины распределительных линий среднего напряжения и оценочного функционала для района с поверхностной плотностью  $30 \text{ МВА/км}^2$ ,  $a=1 \text{ км}$ ,  $b=3 \text{ км}$

# Анализ устойчивости и чувствительности

## Кривые экономической устойчивости



Основные параметры исходной информации:

- стоимость потерь электроэнергии;
- норма дисконтирования;
- продолжительность расчетного срока.

# Выводы по работе:

- 1.** Сформирована новая оригинальная топологическая модель системы электроснабжения периферийных районов крупных городов с применением глубоких вводов с учетом современных тенденций развития городских территорий.
- 2.** Разработана математическая модель системы электроснабжения периферийных районов крупных городов, описывающая критерии оптимизации основных параметров системы и учитывающая ее электротехнические, топологические и экономические характеристики.
- 3.** Получены критерии целесообразности сооружения и оптимальных параметров глубоких вводов высокого напряжения.
- 4.** Получены результаты оптимизации параметров ГВ по критериям минимума дисконтированных затрат и минимума суммарной длины распределительных линий среднего напряжения