

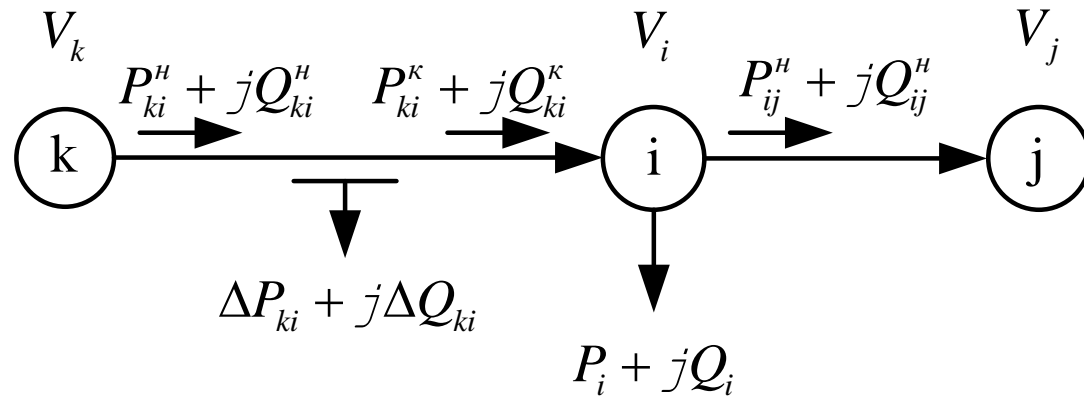
Потоковая модель в задачах расчёта и анализа установившихся режимов распределительных сетей

Баннх Павел Юрьевич
к.т.н., доцент кафедры
Автоматизированные электрические системы
УралЭНИН УрФУ

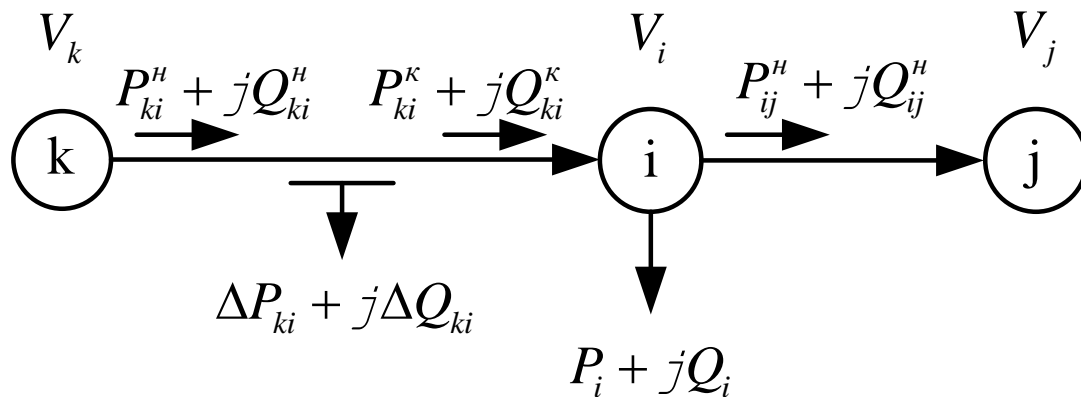


Потоковая модель (ПМ) – это набор нелинейных уравнений, который описывает установившийся режим электрической сети.

- Является альтернативой уравнениям узловых напряжений (УУН)
- Исходная информация и результат расчёта для ПМ и УУН совпадают
- В качестве неизвестных в ПМ используются:
 - Активные мощности условного начала ветвей
 - Реактивные мощности условного начала ветвей
 - Модули напряжений в узлах электрической сети
- В ПМ больше уравнений и неизвестных по сравнению с УУН, при этом ПМ обладает лучшими вычислительными характеристиками



Уравнения баланса активной мощности в узле	$\sum (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^K) + P_i = 0$	Для каждого узла кроме балансирующего
Уравнения баланса реактивной мощности в узле	$\sum (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^K) + Q_i = 0$	Для каждого нагрузочного узла
Уравнение баланса активной мощности в ветви	$P_{ki}^K = P_{ki}^H - \Delta P_{ki}$	Для каждой ветви
Уравнение баланса реактивной мощности в ветви	$Q_{ki}^K = Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}$	Для каждой ветви
Уравнение падения напряжения	$\sqrt{(V_k - \Delta V_{ki}')^2 + (\Delta V_{ki}'')^2} - V_i = 0$	Для каждой ветви



Уравнения баланса активной мощности в узле	$\sum (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^H - \Delta P_{ki}) + P_i = 0$	Для каждого узла кроме балансирующего
Уравнения баланса реактивной мощности в узле	$\sum (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}) + Q_i = 0$	Для каждого нагрузочного узла
Уравнения падения напряжения	$\sqrt{(V_k - \Delta V'_{ki})^2 + (\Delta V''_{ki})^2} - V_i = 0$	Для каждой ветви

Вектор неизвестных: активная мощность начала ветви P_H
 реактивная мощность начала ветви Q_H
 модуль напряжения в узлах ветви V

Для замкнутого контура в графе электрической сети переменного тока справедливо (из второго закона Кирхгофа), что

сумма падений напряжений в замкнутом контуре равна нулю

$$\sum \Delta \dot{U} = 0$$

Если отдельно рассматривать для модулей и углов напряжений:

$$\sum \Delta V = 0$$

$$\sum \Delta \delta = 0$$

В потоковой модели необходимо использовать уравнение: $\sum \Delta\delta = 0$

Уравнение $\sum \Delta V = 0$ является линейно зависимым от уравнений падения напряжения.

Если выразить уравнение $\sum \Delta\delta = 0$ через вектор неизвестных:

$$\sum atan\left(\frac{\Delta V''_{ki}}{V_k - \Delta V'_{ki}}\right) = 0$$

Где:

$$\Delta V'_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot R_{ki} + Q_{ki}^H \cdot X_{ki}}{V_k} \quad \Delta V''_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot X_{ki} - Q_{ki}^H \cdot R_{ki}}{V_k}$$

Итоговая система уравнений

Уравнения баланса активной мощности в узле	$\sum (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^H - \Delta P_{ki}) + P_i = 0$	Для каждого узла кроме балансирующего
Уравнения баланса реактивной мощности в узле	$\sum (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}) + Q_i = 0$	Для каждого нагрузочного узла
Уравнения падения напряжения	$\sqrt{(V_k - \Delta V'_{ki})^2 + (\Delta V''_{ki})^2} - V_i = 0$	Для каждой ветви
Контурные уравнений	$\sum atan\left(\frac{\Delta V''_{ki}}{V_k - \Delta V'_{ki}}\right) = 0$	Для каждого контура в графе сети
Потери активной и реактивной мощности	$\Delta P_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} R_{ki} \quad \Delta Q_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} X_{ki}$	
Продольная и поперечная составляющие падения напряжения	$\Delta V'_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot R_{ki} + Q_{ki}^H \cdot X_{ki}}{V_k} \quad \Delta V''_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot X_{ki} - Q_{ki}^H \cdot R_{ki}}{V_k}$	

Вектор неизвестных: активная мощность начала ветви P_H
 реактивная мощность начала ветви Q_H
 модуль напряжения в узлах ветви V

Потоковая модель может быть применена расчётных задачах, связанных с установившимися режимами электрических сетей:

- Расчёты установившихся режимов
- Оптимизация установившихся режимов
- Оценивания состояния установившихся режимов

Преимущества потоковой модели проявляются на моделях распределительных сетей:

- Радиальная структура сети
- Линии различной длины
- Соотношение $X/R \approx 1$

Принципиальным отличием ПМ от классических уравнений узловых напряжений является:

- Исключение углов напряжений из вектора неизвестных
- Лучшие вычислительные характеристики:
 - Итерационные методы, которые используются в задачах расчётов установившихся режимов, оптимизации и оценивания состояния лучше сходятся

Исключение фазовых углов напряжений

- Сложности непосредственного использования
- Малые погрешности в значениях углов приводят к большим погрешностям в уравнениях (особенно в тяжелых и предельных режимах)
- Измерение фактических углов возможно только с применением технологий синхронизированных векторных измерений

Нечувствительность к неоднородности сопротивлений в схеме замещения электрической сети

Актуально для:

- Схемы с линиями разной длины
- Схемы с соотношением активного и реактивного сопротивления ($R/X \approx 1$)
- Схемы с автотрансформаторами (нулевое сопротивление обмотки СН)
- Наличие элементов с нулевыми сопротивлениями

Нечувствительность к неоднородности сопротивлений в схеме замещения электрической сети

Сопротивления присутствуют только в выражениях для потерь:

Потери активной и реактивной мощности

$$\Delta P_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} R_{ki} \quad \Delta Q_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} X_{ki}$$

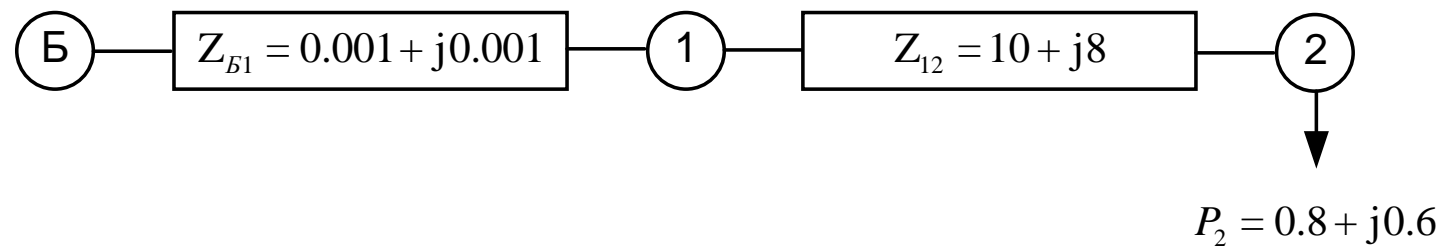
Продольная и поперечная составляющие падения напряжения

$$\Delta V'_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot R_{ki} + Q_{ki}^H \cdot X_{ki}}{V_k} \quad \Delta V''_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot X_{ki} - Q_{ki}^H \cdot R_{ki}}{V_k}$$

Потери мощности (напряжения) не превышают значений самих мощностей (напряжений), из-за этого не возникает разно-размерности величин, которая приводит к плохой обусловленности

Нечувствительность к неоднородности сопротивлений в схеме замещения электрической сети

$$U_b = 10.2 \text{ кВ}$$



Число обусловленности для УУН: $1.3 \cdot 10^5$

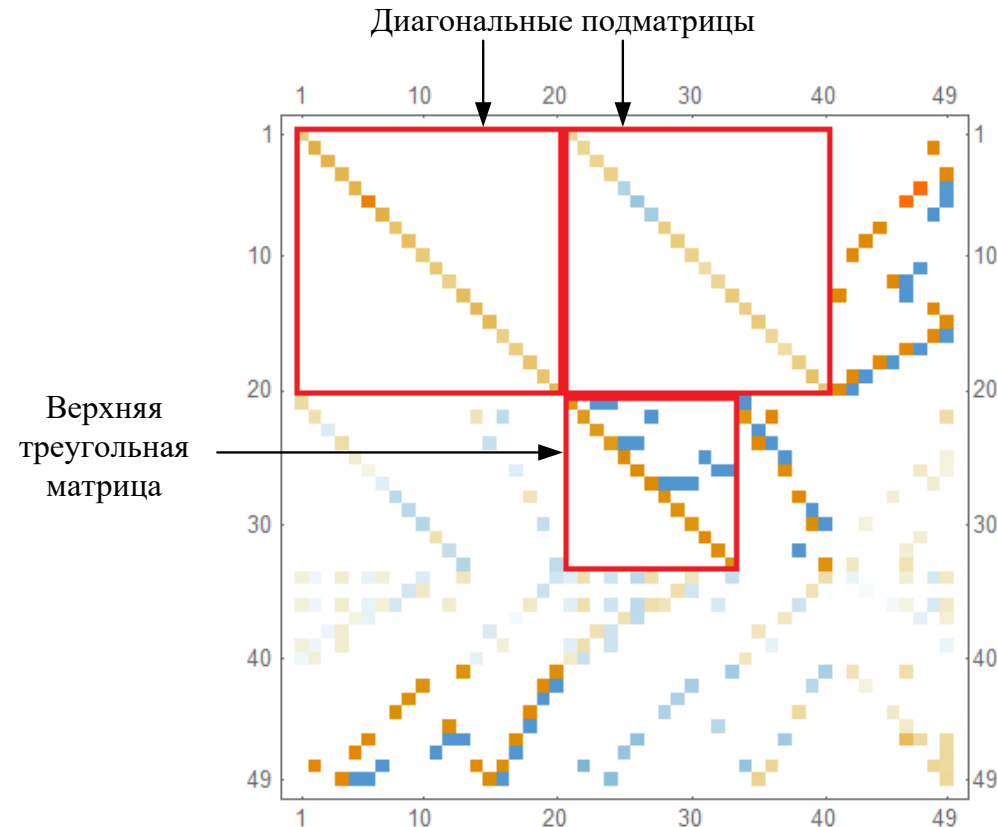
Число обусловленности для ПМ: 6.6

- Высокая обусловленность по сравнению с уравнениями узловых напряжений
- Лучшая сходимость итерационных методов (задачи УР, ОС, оптимизация)

- Увеличенная размерность системы уравнений ПМ, по сравнению УУН.
- Уравнения ПМ сложнее, по сравнению с УУН, как следствие для ПМ сложнее выполнить алгоритмизацию расчёта и программную реализацию
- Для составления уравнений ПМ требуется применение алгоритмов анализа графа электрической сети
- Уравнения потоковой модели имеют различные размерности:
 - Активная и реактивная мощность (МВА)
 - Напряжения (кВ)
 - Углы (радианы)

Путем сортировок порядка уравнений и неизвестных, так же учёта разреженной структуры матрицы первых производных при расчёте различными численными методами возможно снизить объем расчётов ≈ 7

Пример структуры матрицы
первых производных для
схемы IEEE 14



Наиболее актуальными задачами, где важна скорость расчёта являются:

- Вариантные расчёты установившихся режимов
- Задачи дискретной оптимизации:
 - Оптимальная конфигурация сети (минимум потерь)
 - Размещение средств компенсации реактивной мощности (СКРМ)
 - Выбор оптимальных коэффициентов трансформации и состояния СКРМ
 - Расчёт показателей надёжности

При проведении большого числа расчётов на одной схеме при применении потоковой модели:

- Рассмотрение различных конфигураций схемы может быть выполнено за счёт изменения сопротивлений, что не сказывается на результатах расчётов в случае ПМ
- Анализ графа электрической сети достаточно выполнить всего один раз
- Сортировки уравнений и неизвестных для ускорения расчёта достаточно выполнить всего один раз
- Уменьшение числа итераций ощутимо сказывается на времени расчёта

Простота учёта ограничений

Вектор переменных содержит:

- Мощности ветвей
- Напряжения узлов

Ограничения на эти величины являются простыми и линейными, это открывает возможность для применения методов последовательного линейного программирования и последовательного квадратичного программирования

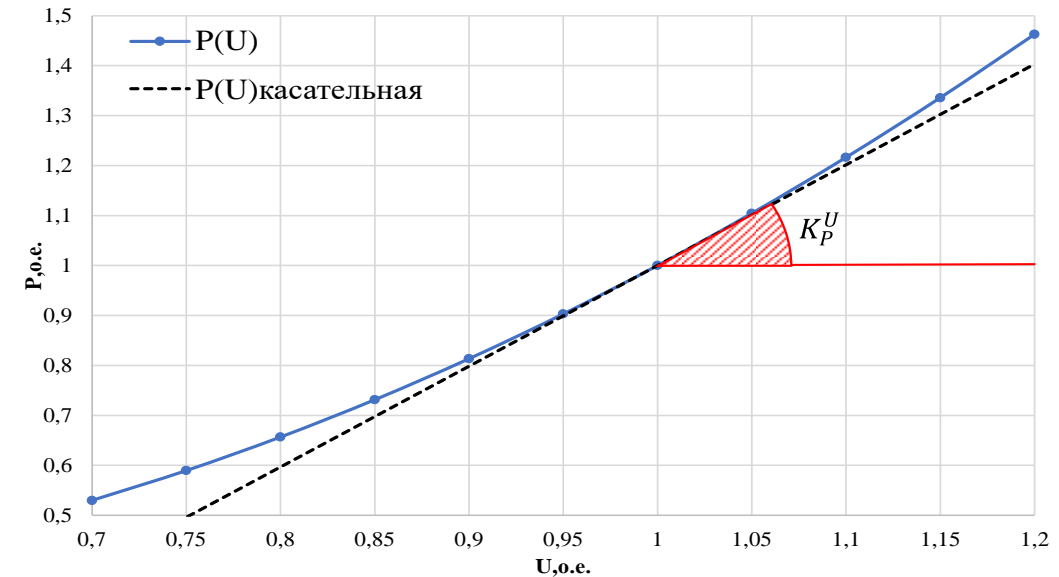
В ходе работ по разработке алгоритмов оптимизации распределительной сети был выявлен следующий эффект, если учитывать нагрузку в узлах сети в форме СХН

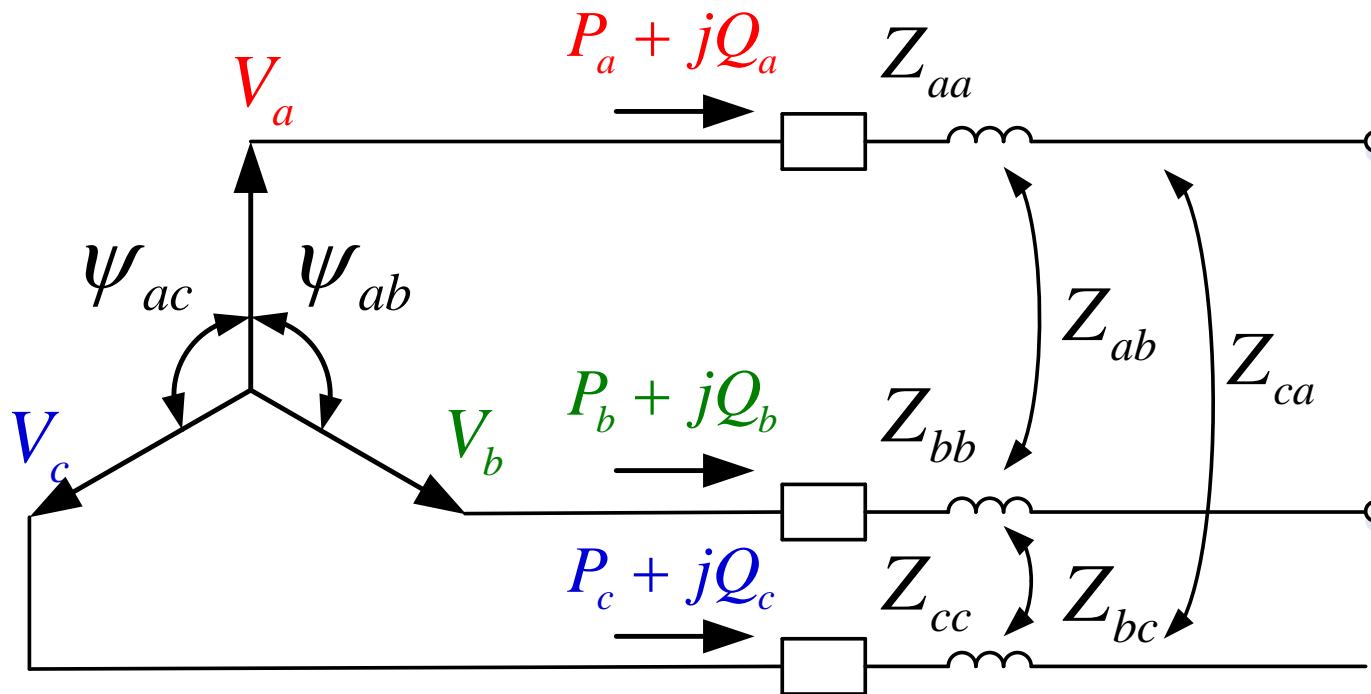
$$P(U) = P_{\text{НОМ}} \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 \right)$$

и регулирующий эффект нагрузки $K_p^U = \frac{dP(U)}{dU} > 1$, тогда:

увеличение напряжения приводит к росту потерь в сети

Это объясняется тем, что с ростом напряжения растёт и нагрузка в сети, а с ростом нагрузки и перетоков увеличиваются и потери в сети.





Вектор искомых переменных:

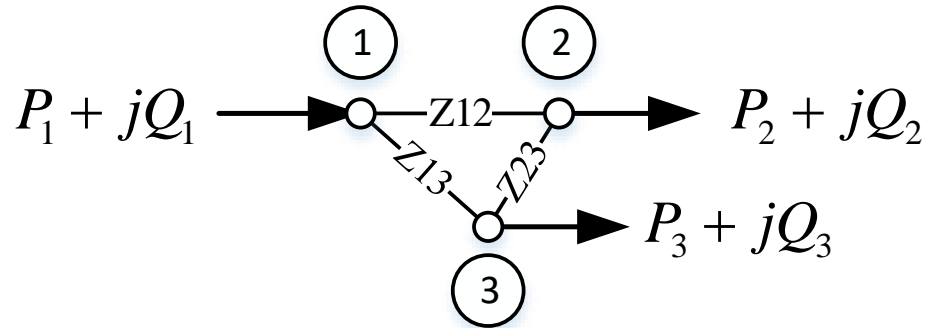
$\mathbf{P}_{abc} = P_a, P_b, P_c$ – активные мощности начала ветви каждой из фаз

$\mathbf{Q}_{abc} = Q_a, Q_b, Q_c$ – реактивные мощности начала ветви каждой из фаз

$\mathbf{V}_{abc} = V_a, V_b, V_c$ – модули фазных напряжений

$\boldsymbol{\psi}_{abc} = \psi_{ab}, \psi_{ac}$ – междофазные углы

Трёхфазная потоковая модель



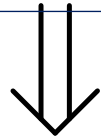
Вектор переменных: $\mathbf{X} = \{P^H, Q^H, V\}$ (1)

Уравнения:
 $\Sigma(P) = f(\mathbf{X}, \Delta P) = 0.$ (2)

$\Sigma(Q) = f(\mathbf{X}, \Delta Q) = 0.$ (3)

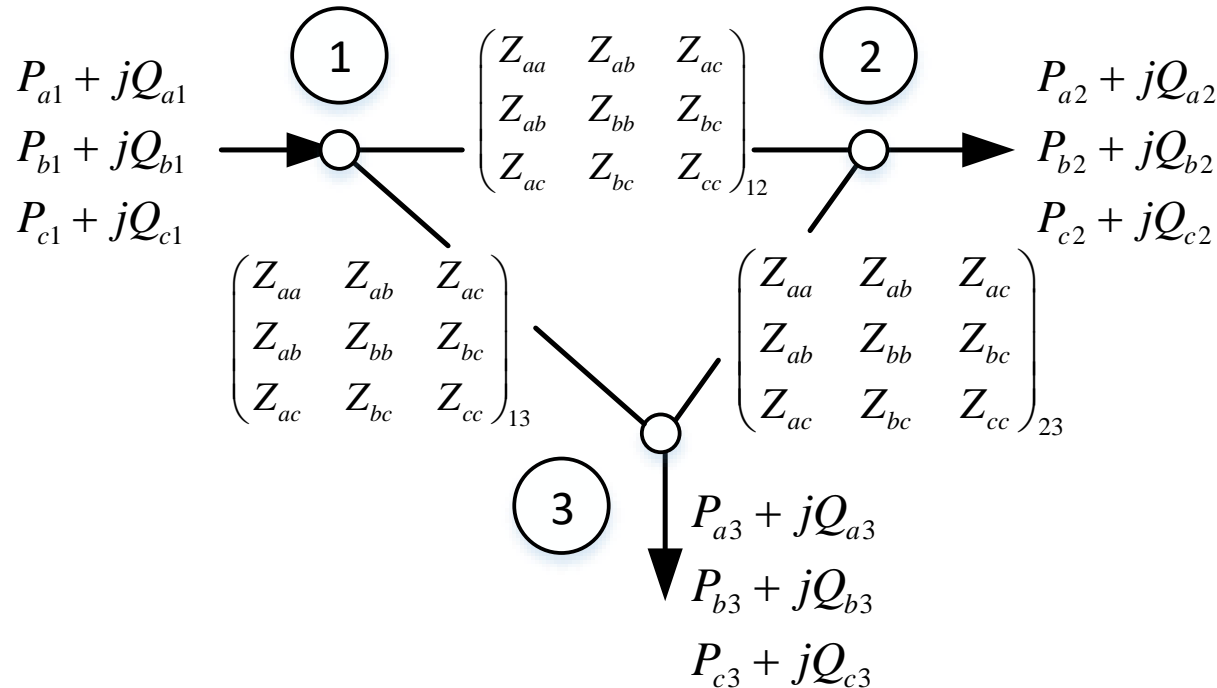
$V_i - f(\mathbf{X}, \Delta V', \Delta V'') - V_j = 0.$ (4)

$\Sigma(\Delta\delta) = f(\mathbf{X}, \Delta V', \Delta V'') = 0.$ (5)



Вектор переменных

$\mathbf{X} = \{\mathbf{P}_{abc}, \mathbf{Q}_{abc}, \mathbf{V}_{abc}, \boldsymbol{\psi}_{abc}\}$ (6)



Новые выражения для 3ф. ЛЭП и трансформаторов:

$\Delta V'_{abc} = f(\mathbf{X}, \mathbf{Z}_{abc}) \quad \Delta V''_{abc} = f(\mathbf{X}, \mathbf{Z}_{abc})$ (7)

$\Delta \mathbf{P}_{abc} = f(\mathbf{X}, \mathbf{Z}_{abc}) \quad \Delta \mathbf{Q}_{abc} = f(\mathbf{X}, \mathbf{Z}_{abc})$ (8)

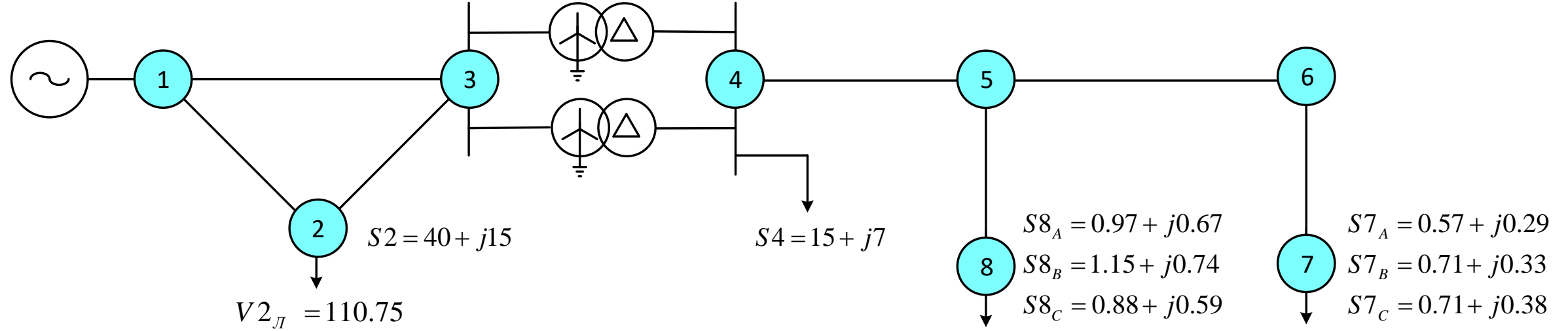
Добавляются уравнения изменения междофазных углов на линии

$\psi_{ABi} + \Delta\delta_{Aij} - \Delta\delta_{Bij} = \psi_{ABj}$ (9)

$\psi_{ACi} + \Delta\delta_{Aij} - \Delta\delta_{Cij} = \psi_{ACj}$ (10)

Сравнение результатов расчёта установившегося режима на однолинейной и трехфазной модели

$V 1_{JI} = 115$	$V 3_{JI} = 110.94$	$V 4_{JI} = 10.6$	$V 5_{JI} = 9.53$	$V 6_{JI} = 9.32$
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
$V 1_{AB} = 115$	$V 3_{AB} = 110.43$	$V 4_{AB} = 10.59$	$V 5_{AB} = 9.42$	$V 6_{AB} = 9.22$
$V 1_{BC} = 115$	$V 3_{BC} = 111.08$	$V 4_{BC} = 10.55$	$V 5_{BC} = 9.36$	$V 6_{BC} = 9.12$
$V 1_{CA} = 115$	$V 3_{CA} = 111.02$	$V 4_{CA} = 10.67$	$V 5_{CA} = 9.68$	$V 6_{CA} = 9.48$



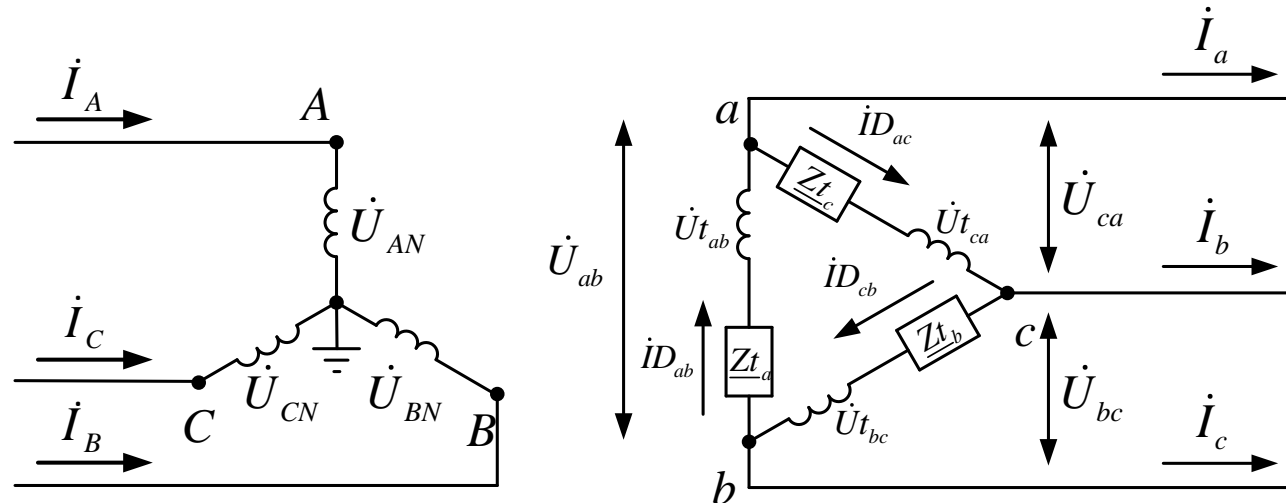
$V 2_{JI} = 110.75$
<hr/>
$V 2_{AB} = 110.33$
$V 2_{BC} = 110.88$
$V 2_{CA} = 110.87$

$V 8_{JI} = 9.07$
<hr/>
$V 8_{AB} = 8.92$
$V 8_{BC} = 8.87$
$V 8_{CA} = 9.28$

$V 7_{JI} = 9.05$
<hr/>
$V 7_{AB} = 8.96$
$V 7_{BC} = 8.81$
$V 7_{CA} = 9.23$

Вычислительные особенности трехфазной потоковой модели

В случае отсутствия связи с землёй в распределительных сетях (трансформаторы Y/D-11), УУН в фазных координатах плохо обусловлены и расчёт ряда ситуаций невозможен.



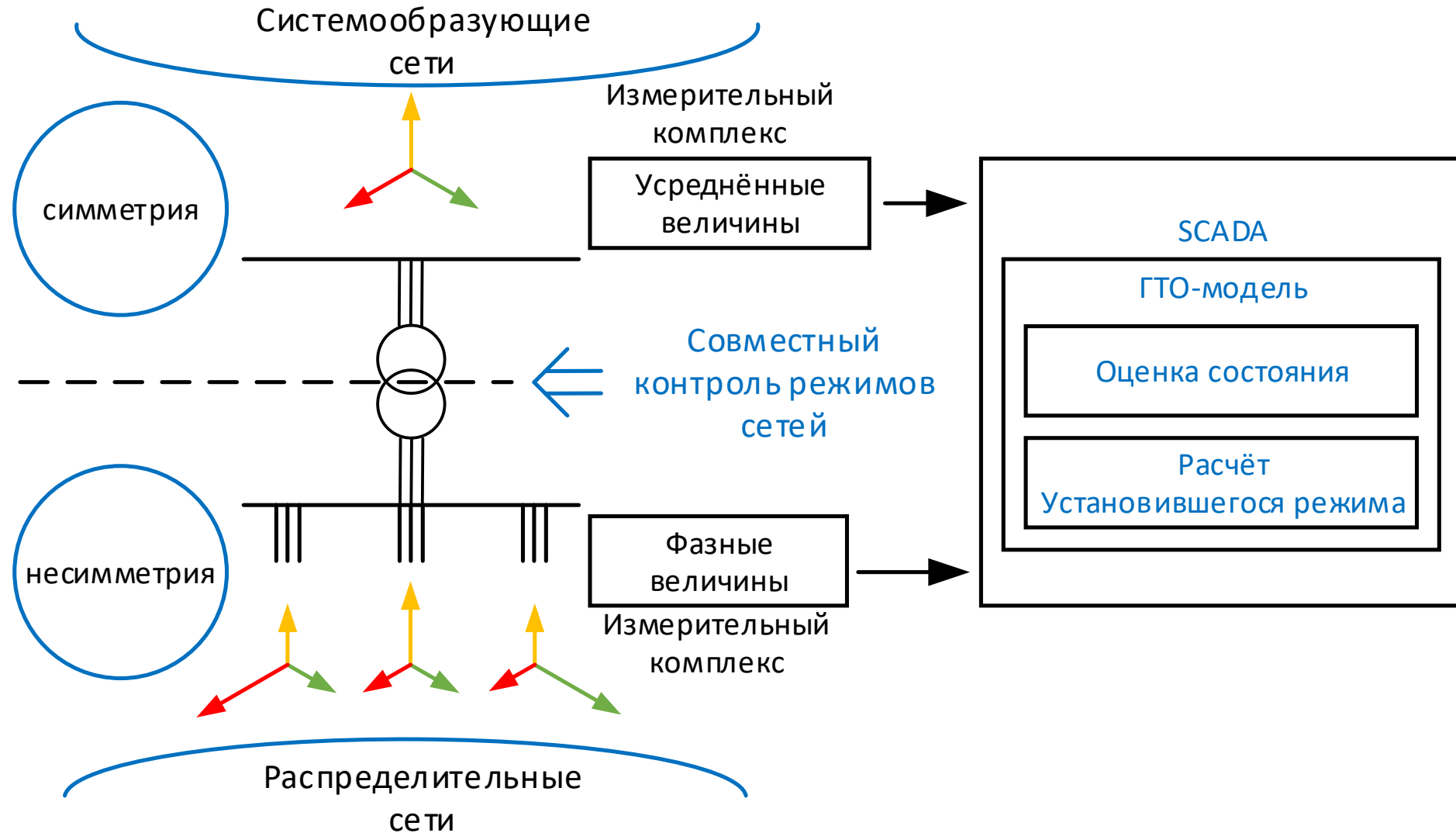
Уравнения потоковой модели выражают напряжения через падение напряжения и позволяют привязаться к напряжению нейтрали со стороны звезды.

Сравнительный анализ вычислительных характеристик трёхфазной потоковой модели

Тип усложнения схемы IEEE 123	Уравнения узловых напряжений	Метод Z-матрицы	Метод прямого-обратного хода	Потоковая модель
Исходная схема	5 итераций	6 итераций	8 итераций	5 итераций
+ Замкнутые контуры + Генераторы	4 итерации	8 итераций	10 итераций	4 итерации
+ Трансформаторы Yg/D	расходится	7 итераций	8 итераций	5 итераций
+ Трансформаторы Yg/D + Доп. несимметрия нагрузки	расходится	расходится	8 итераций	4 итерации
+ Замкнутые контуры + Генераторы + Трансформаторы Yg/D	расходится	18 итераций	расходится	4 итерации
+ Замкнутые контуры + Генераторы + Трансформаторы Yg/D + Доп. несимметрия нагрузки	расходится	расходится	расходится	4 итерации

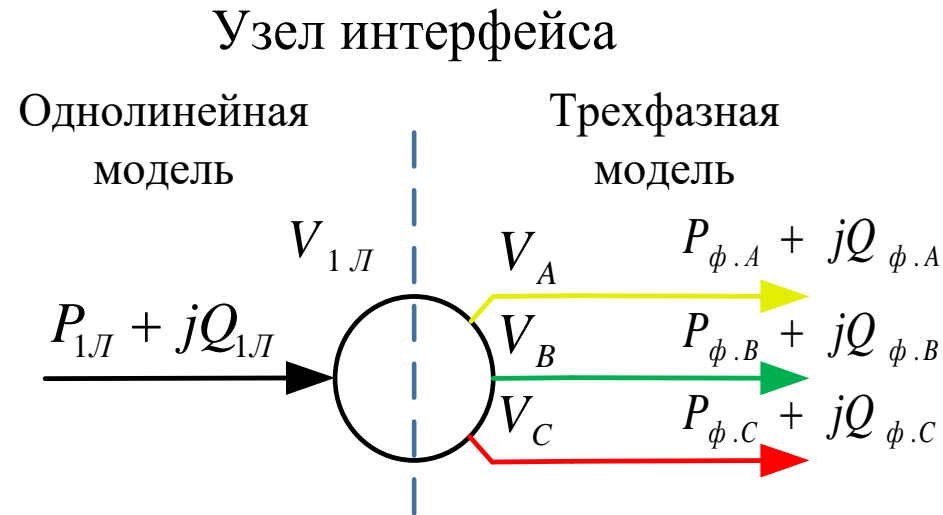
Гибридная Трёхфазно-Однолинейная (ГТО) потоковая модель

25



Гибридная Трёхфазно-Однолинейная (ГТО) ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ

Позволяет в рамках единой расчётной процедуры объединять участки сети в трёхфазном и однолинейном представлении



Для связи мощностей в балансовые уравнения добавляется:

$$P_{1Л} = P_{\phi.A} + P_{\phi.B} + P_{\phi.C}, \quad (1)$$

$$Q_{1Л} = Q_{\phi.A} + Q_{\phi.B} + Q_{\phi.C}. \quad (2)$$

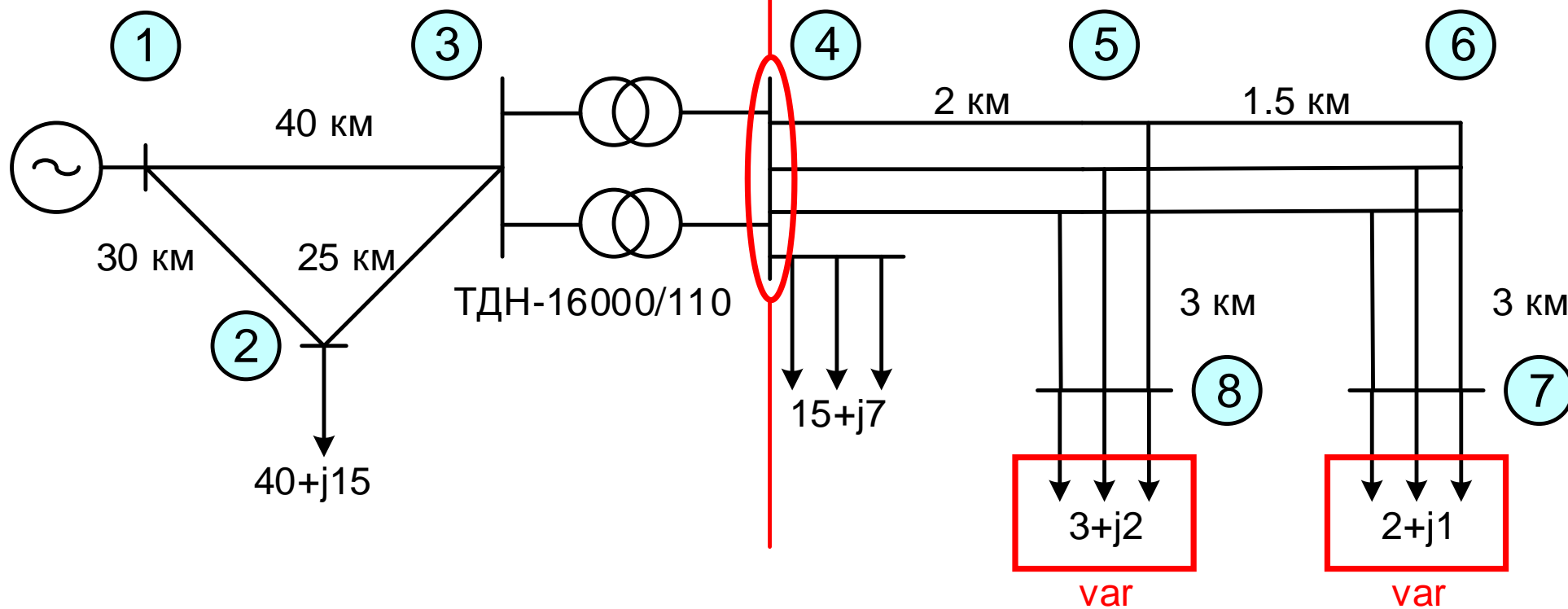
Для связи напряжений вводится усреднение модулей фазных напряжений

$$V_{1Л} = \frac{V_A + V_B + V_C}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Узел интерфейса

Однолинейное
представление сети 110 кВ

Трёхфазное
представление сети 10 кВ



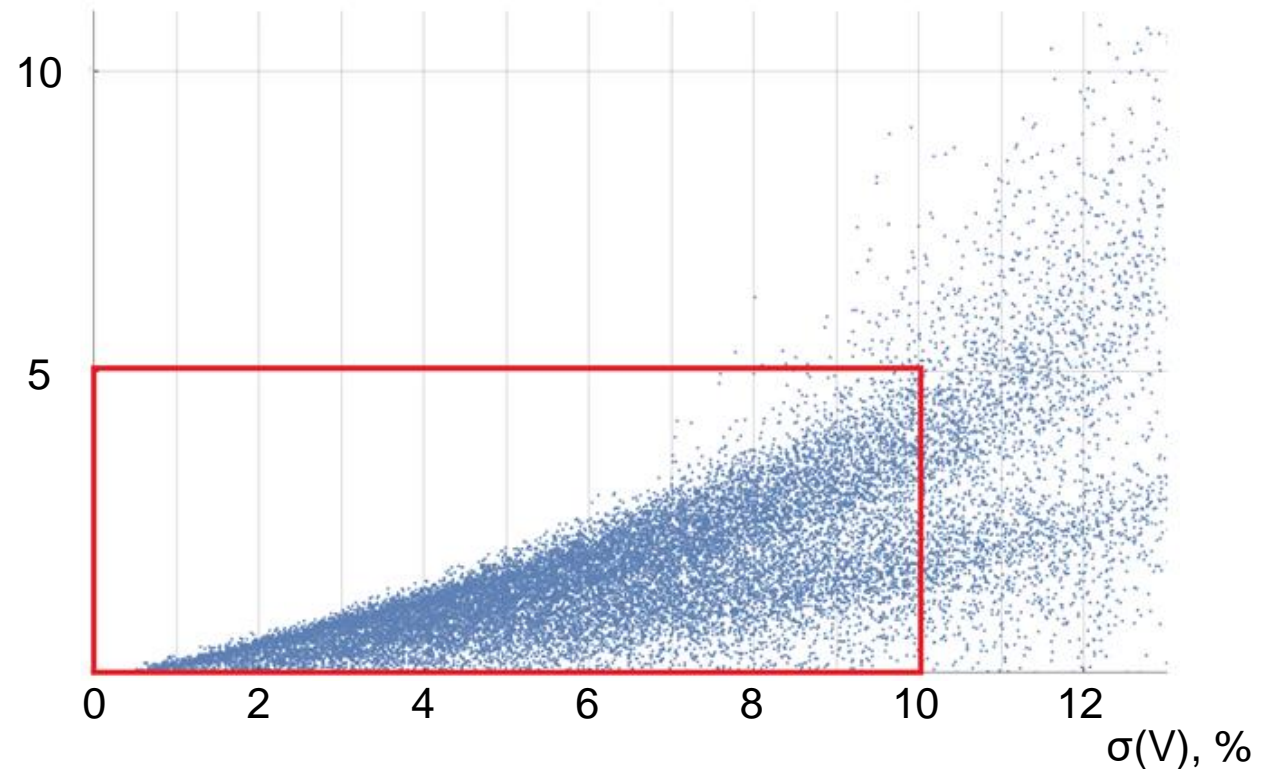
Погрешность рассчитана как максимальное отклонение напряжения в узлах 7 и 8 от эталонного расчёта:

$$\frac{\max(V_{\text{ГТО}} - V_{\text{эталон}})}{V_{\text{НОМ}}} 100\%$$

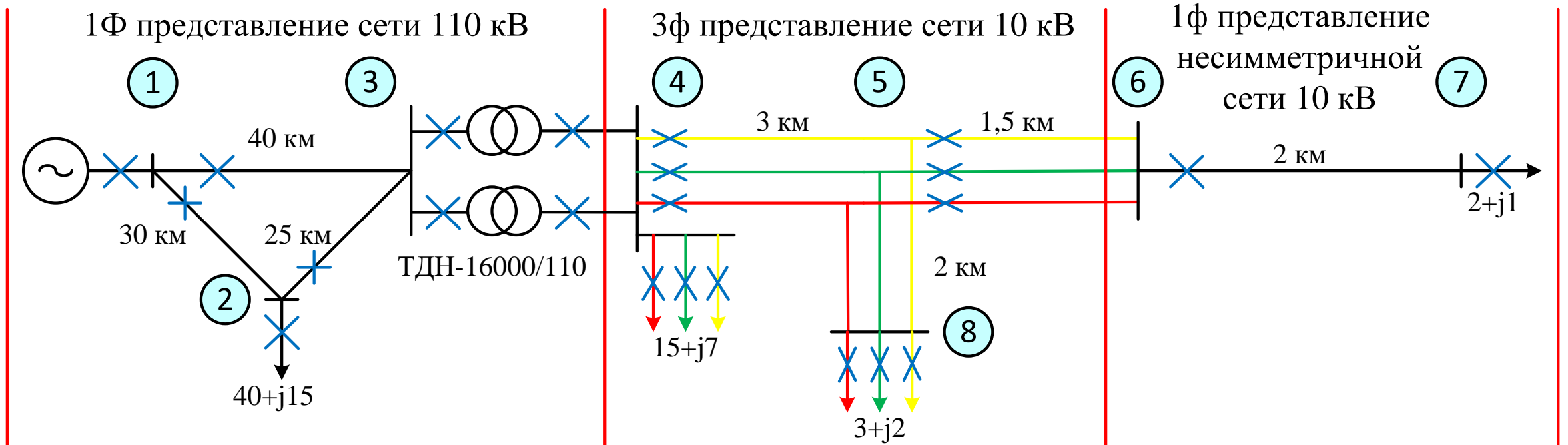
Отклонения напряжения в узле интерфейса (№4) рассчитаны:

$$\frac{\sigma(V_{4a}, V_{4b}, V_{4c})}{V_{\text{НОМ}}} 100\%$$

Погрешность, %



Анализ погрешности – ГТО модель
Эталонный расчёт – полная трехфазная модель



При несимметрии по обратной последовательности 3%, разница между значениями напряжений с применением однолинейного ОС и с применением ГТО модели для ОС может превышать 5%. При этом, разница между режимом, оцененным с помощью ГТО модели и точным эталонным трехфазным режимом не превышала погрешности измерительных комплексов.

1. Представлена потоковая модель установившегося режима. В качестве неизвестных величин используются мощности в ветвях и напряжения узлов. Состав уравнений: уравнения баланса по активной и реактивной мощности в узлах, уравнения падения напряжения в ветвях, контурные уравнения.
2. Принципиальным отличием потоковой модели от классических уравнений узловых напряжений являются лучшие вычислительные характеристики. Итерационные методы, которые используются в задачах расчётов установившихся режимов, оптимизации и оценивания состояния лучше сходятся (методы стабильнее сходятся к решению и за меньшее количество итераций) .
3. Преимущества потоковой модели проявляются в расчётных задачах для распределительных сетей ввиду их специфических особенностей в части конфигурации и параметров

4. Представлена трехфазная потоковая модель, которая позволяет учитывать несимметрию элементов схемы замещения и режимных параметров, характерных для распределительных сетей. Модель обладает лучшими вычислительными характеристиками по сравнению с УУН для сетей с изолированной нейтралью.
5. Представлена ГТО модель (гибридная трехфазно-однолинейная модель), которая позволяет объединить единой расчётной процедуре фрагменты сети, имеющие трехфазное и однолинейное представление. Это позволяет использовать всю полноту имеющейся информации о электрической сети (параметры схемы замещения и измерения режимных параметров) для анализа её режимов.

На текущий момент идёт работа по разработке методов оптимизации режимов распределительных сетей.

Для развития данной тематики необходима промышленная программная реализация алгоритмов, отвечающая требованиям современной архитектуры программного обеспечения (масштабируемость, гибкость, быстроедействие)

Основная проблема – отсутствие кадров, которые квалифицированы и в области электроэнергетики и в области компьютерных наук, а также имеющих навыки необходимые в R&D IT проектах.