



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР  
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



# Применение метода голоморфного погружения для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем и оценки их устойчивости

---

Докладчик:

Кабалин Дмитрий Андреевич

Научный руководитель:

Исаев Ю.Н., д.ф.-м.н., профессор

Кемерово, 2020

- Актуальность
- Метод голоморфного погружения
- Алгоритм расчета УР методом голоморфного вложения
- Разработка приложения
- Тестирование алгоритма
- Расчет УР методом голоморфного погружения
- Оценка существования режима
- Заключение

Результаты расчетов установившихся режимов используются для решения следующих задач:

- проверка допустимости планируемых режимов,
- рассмотрение заявок на ремонты оборудования,
- выбор уставок противоаварийной автоматики,
- решение вопросов регулирования напряжения,
- разработка мер по снижению потерь электроэнергии и т.д.

Алгоритм расчета УР используется также в составе более сложных алгоритмов: оптимизация режимов, алгоритмы СМЗУ и ЦСПА.

В 2012 году предложен новый метод - метод голоморфного вложения.

Основой всех существующих вычислительно эффективных методов расчета УР, в том числе реализованных в промышленных программах, является метод **Ньютона-Рафсона**.

Недостатки метода Ньютона-Рафсона:

- **зависимость** итерационного процесса от начальных приближений;
- возможное **расхождение** итерационного процесса, даже если решение существует.



УУН в форме баланса токов:

$$\sum_{j=0}^N \underline{Y}_{ij} \dot{U}_j = \frac{\dot{S}_i^*}{\dot{U}_i^*} \quad \xrightarrow{\alpha} \quad \sum_{j=0}^N \underline{Y}_{ij} \dot{U}_j(\alpha) = \frac{\alpha \dot{S}_i^*}{\dot{U}_i^*(\alpha^*)} = \alpha \dot{S}_i^* W_i^*(\alpha^*)$$

$U_i(\alpha) = U_i[0] + U_i[1]\alpha + \dots + U_i[n]\alpha^n$  – голоморфная функция напряжения;

$W_i^*(\alpha^*) = \frac{1}{U_i^*(\alpha^*)} = \sum_0^n W_i^*[n]\alpha^n$  – голоморфная функция обратная функции напряжения.

1. При  $\alpha = 0$  все члены инъекций мощности исчезают, напряжение балансирующего узла распространяется на все узлы

$$U_j(0) = U_j[0] = U_\sigma$$

2. n-ые члены степенных рядов могут быть найдены по рекуррентному выражению

$$\sum_{j=0}^N \underline{Y}_{nij} \dot{U}_j[n] = \dot{S}_i^* \dot{W}_i^*[n-1] - \underline{Y}_{mi} \dot{U}_i[n-1], i \in PQ$$

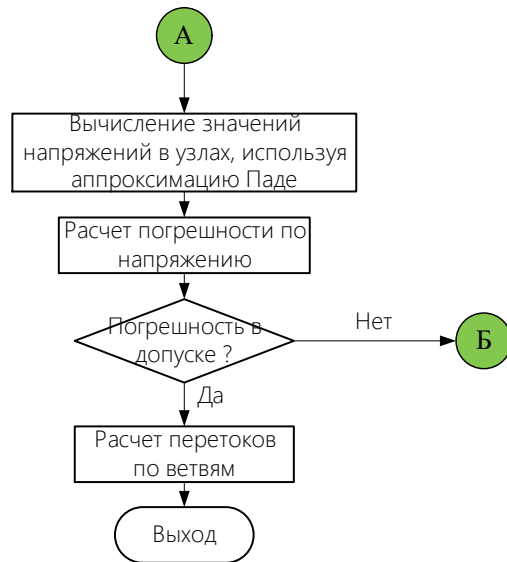
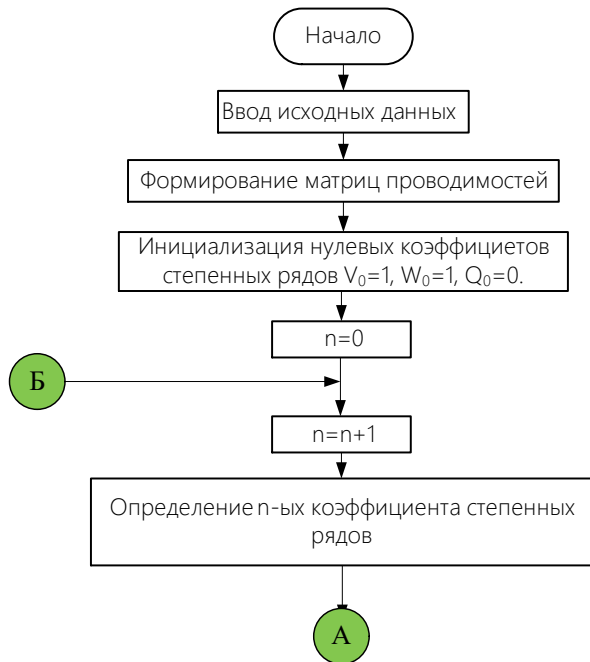
3. Для расширения радиуса сходимости степенного ряда напряжения используется аналитическое продолжение – аппроксимация Паде

$$U_j(\alpha) = \sum_{n=0}^{L+M} U_j[n]\alpha^n = \frac{\sum_{n=0}^L a[n]\alpha^n}{\sum_{n=0}^M b[n]\alpha^n}$$

4. Искомое решение определяется при подстановке  $\alpha = 1$

$$U_j = U_j(1)$$

# Алгоритм расчета УР методом голоморфного вложения



Укрупненная блок-схема алгоритма расчета УР методом голоморфного вложения

The screenshot shows the HELM application window. The interface includes a menu bar, a toolbar, a tabbed interface, and a data table. The following table is displayed in the application:

	S	Тип	Номер	U_ном	P_н	Q_н	G_ш	B_ш
▶ 1		Нагр	1	115	90	49	0	0
2		Нагр	2	115	56	15	0	0
3		Нагр	3	230	20	0	0	0
4		Нагр	4	345	0	0	0	0
5		Нагр	5	115	353	130	0	0
6		Нагр	6	115	120	41	0	0
7		Нагр	7	230	0	0	0	0
8		Ген	8	115	63	14	0	0
9		Нагр	9	115	96	43	0	0

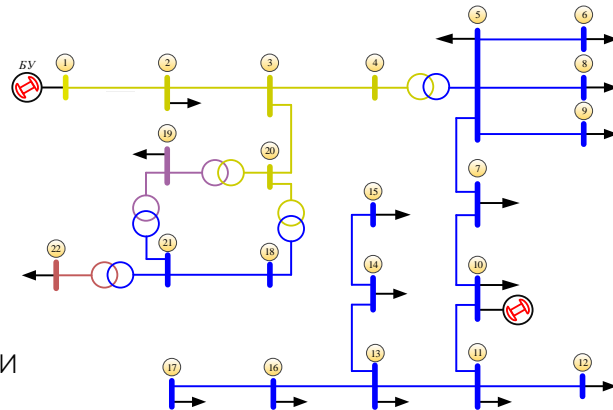
Numbered callouts in the image point to: 1 - Menu bar; 2 - Toolbar; 3 - Tabbed interface; 4 - Sub-tabbed interface; 5 - Sub-tabbed interface toolbar; 6 - Data table; 7 - Status bar.

Описание:

- 1 – Строка меню,
- 2 – Панель инструментов,
- 3 – Панель вкладок,
- 4 – Панель вкладок (вложенная) с таблицами,
- 5 – Панель инструментов для работы с таблицей,
- 6 – Таблица данных,
- 7 – Строка состояния.



- Для тестирования правильности расчета УР использовались:
  - ❖ 2-, 3-, 7, 22-узловые тестовые схемы;
  - ❖ 14-, 30-, 118-, 145-, 300-узловые тестовые схемы *IEEE*;
  - ❖ 15-узловая тестовая схема ЦСПА, а также 196-узловая схема ЦСПА ОЭС Сибири.
- Результаты расчета сравнивались с результатами ПК «RastrWin3».



22-узловая тестовая схема

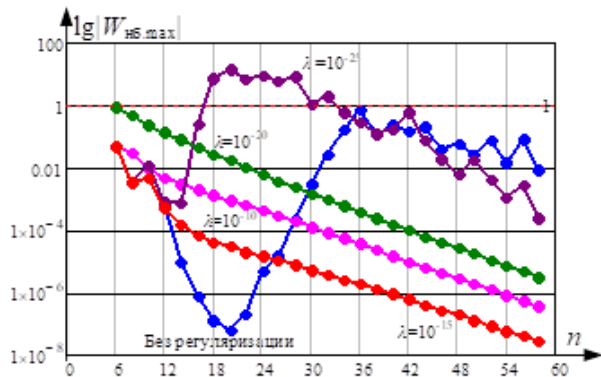


График изменения наибольшего небаланса мощности в узлах от количества членов степенного ряда и параметра регуляризации

Функция напряжения

$$U_{19}(\alpha) = 1,104 + j0.0001709 + (-0.09575 + j0.2575)\alpha + \dots + (-0.00004485 - j0.000003623)\alpha^{12}.$$

Аппроксимацию Паде

$$U_5(\alpha) = \frac{1.104 + j0.0001709 + \dots + (0.00001666 - j0.00004553)\alpha^6}{1 + (-0.9836 - 0.2313i)\alpha + \dots + (0.0001211 + j0.0002085)\alpha^6}.$$

$$U_{19}(1) = 0.9167 + j0.23137 = 0.9506e^{-j14.209^\circ}$$

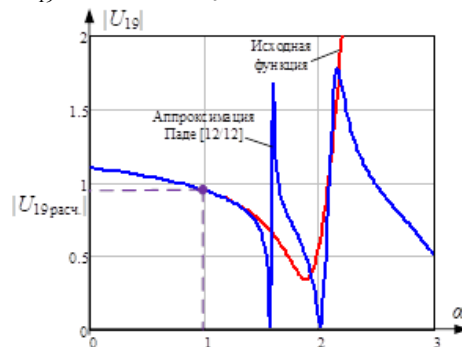
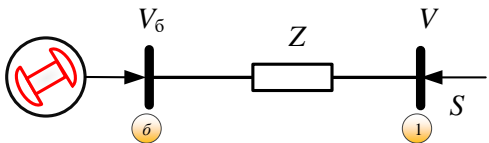


График степенного ряда напряжения и соответствующая ему аппроксимация Паде для узла 19



# Оценка существования режима на основе Sigma-графика



$$V = V_0 + \frac{ZS^*}{V^*} \quad \text{или} \quad U = 1 + \frac{\sigma}{U^*}$$

$$\text{где } U = \frac{V}{V_0}, \quad U^* = \frac{V^*}{V_0^*}, \quad \sigma = \frac{ZS^*}{|V_0|^2} = \sigma_r + j\sigma_i$$

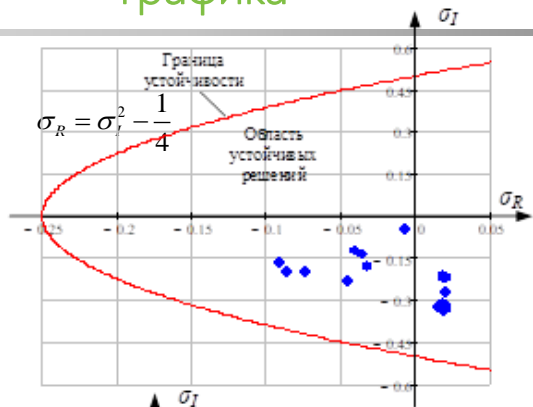
Искомое напряжение

$$U = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \sigma_r - \sigma_i^2 + j\sigma_i}$$

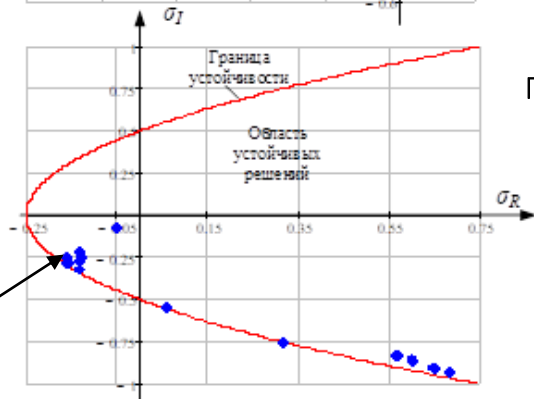
Условие существования режима для двухузловой схемы:

$$D = \frac{1}{4} + \sigma_r - \sigma_i^2 \geq 0 \Rightarrow \sigma_r \geq \sigma_i^2 - \frac{1}{4}$$

$$U_i(\alpha) \Rightarrow \sigma_i(\alpha) \Rightarrow \sigma_i = [L/M]_{\sigma_i(\alpha)} \Big|_{\alpha=1}$$



Нормальный режим



Предельный режим

Значения нулей и полюсов аппроксиманта Паде:

$$[L/M]_{f(\alpha)} = \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} \Rightarrow \begin{cases} a(\alpha) = 0 \\ b(\alpha) = 0 \end{cases} \Rightarrow \alpha_{\text{ноль}}, \alpha_{\text{полюс}}$$

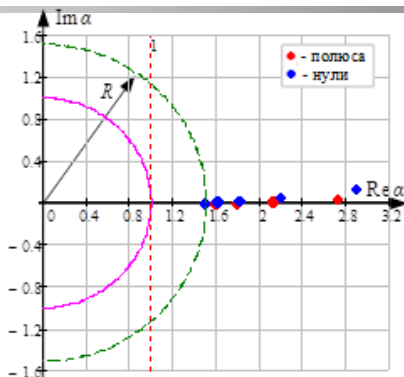
Точка ветвления без расчета полюсов и нулей аппроксимаций Паде может быть приближенно определена по критерию Фабри

$$R_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|c_n|}{|c_{n+1}|},$$

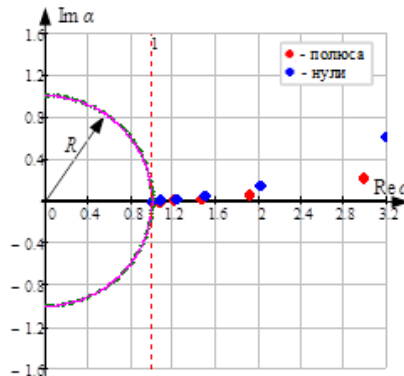
$c_0, c_1, \dots, c_n$  – коэффициенты функции напряжения  $i$ -го узла

$$U_i(\alpha) = c_0 + c_1\alpha + \dots + c_n\alpha^n$$

Режим	Мин. полюс	Мин. ноль	$\min(R_i)$	$1/\min(R_i)$
Нормальный режим	1,5086	1,512911	1,509797	0,662341
Предельный режим,	1,005364	1,00707	1,003287	0,996724
Нефизическое решение	0,98805	0,989631	0,985943	1,014257



Нормальный режим



Предельный режим



- ✓ Метод голоморфного погружения позволил получить корректные результаты для рассмотренных тестовых схем, при этом для него не требуется задавать начальное приближение.
- ✓ Метод открывает новые возможности анализа состояний энергосистем, решения проблемы существования и анализа устойчивости за счет использования концепций применения алгебраических кривых и комплексного анализа.

# Применение метода голоморфного погружения для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем и оценки их устойчивости

## СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик: Кабалин Дмитрий Андреевич

Организация: НИ ТПУ

Контактная информация: [mitya.kabalin@gmail.com](mailto:mitya.kabalin@gmail.com)