

# КОМПЛЕКСНОЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**П.Д. Лежнюк**, докт. техн. наук, **В.В. Кулик**, канд. техн. наук  
Винницкий национальный технический университет

## Введение

Одной из основных причин неоптимальности режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и, соответственно, дополнительных потерь электроэнергии при ее транспорте и распределении является неоднородность ЭЭС. Неоднородность ЭЭС приводит также к другим отрицательным явлениям: снижение качества электроэнергии, дополнительная загрузка ЛЭП низших уровней напряжений, а также снижение уровня статической и динамической устойчивости ЭЭС, что в свою очередь уменьшает пропускную способность системы в целом [1, 2]. Неоднородность является конструктивным параметром ЭЭС, поэтому отрицательно влияет на ее режимы на протяжении всего времени функционирования системы.

В данной работе рассматривается комплексное решение задачи компенсации отрицательного влияния неоднородности ЭЭС на оптимальность процессов передачи и распределения электроэнергии в ней на единых методологических основах. Комплексность состоит в одновременном усовершенствовании принципов рационального построения (проектирования) электрических сетей и их реконструкции, а также создании системы автоматического управления (САУ) потоками мощности в ЭЭС с целью их оптимизации. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что для анализа влияния неоднородности ЭЭС на их режимы используются общесистемные показатели, а при создании систем оптимального управления потоками мощности и напряжением используются методы и средства теории подобия.

Снижение меры неоднородности ЭЭС достигается за счет установления в ней установок продольной компенсации (УПК), реакторов или изменения конструкции ЛЭП. Данный путь решения проблемы неоднородности требует значительных капитальных затрат и может быть применен лишь тогда, когда мера неоднородности обусловлена небольшим количеством элементов ЭЭС, или если из тех или иных причин необходима реконструкция существующих сетей.

Сейчас как раз сложилась такая ситуация, когда стоит проблема реконструкции электрических сетей энергосистем. Предусматривается проведение широкомасштабных мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению сетей. В соответствие с этим актуальными являются:

- разработка принципов рационального построения схем электрических сетей и их реконструкции с ориентацией на устранение причин неоптимальности ЭЭС, то есть создание условий самооптимизации их режимов, что свойственно однородным системам;
- разработка и усовершенствование способов повышения эффективности капитальных вложений на проведение реконструкции, направленной на достижение общесистемного эффекта.

Для достижения желательного эффекта в данном направлении необходимо пересмотреть стратегию проектирования и реконструкции электрических сетей таким образом, чтобы каждый шаг по реконструкции был направлен на достижение общесистемного эффекта, то есть на приближение ЭЭС к однородному состоянию. В соответствие с этим возникает задача определения такого показателя неоднородности, который бы однозначно характеризовал уровень оптимальности ЭЭС в целом (меру

приближения к однородному состоянию) и определялся конструктивными параметрами системы.

Относительно второго направления - компенсации влияния неоднородности ЭЭС режимными мероприятиями в процессе эксплуатации, то следует отметить, что с учетом сложности ЭЭС как объекта управления и ее особенностей режимного характера отслеживать и постоянно корректировать значения параметров с целью оптимизировать режимы ЭЭС возможно лишь с помощью САУ регулируемыми устройствами (РУ). В связи с этим возникают две задачи:

- разработка структурной схемы САУ с учетом условий эксплуатации ЭЭС, технического состояния РУ и их регулировочного эффекта;
- формирование законов оптимального управления и координация управляющих воздействий локальных адаптивных САУ для достижения общесистемного эффекта.

### **Обобщенный показатель неоднородности ЭЭС**

В неоднородной ЭЭС токораспределение в установившемся режиме может быть представлено в виде суммы двух векторов токов [3]:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_e + \dot{\mathbf{I}}', \quad (1)$$

где  $\dot{\mathbf{I}}_e$  – вектор экономических токов в ветвях, найденный в результате расчета режима ЭЭС по ее г-схеме замещения;  $\dot{\mathbf{I}}' = \mathbf{N}\dot{\mathbf{I}}_{yp}$  – вектор дополнительных токов в ветвях, наложение которых на  $\dot{\mathbf{I}}_e$  приводит к выполнению второго закона Кирхгофа;  $\mathbf{N}$  – вторая матрица соединений;  $\dot{\mathbf{I}}_{yp}$  – вектор контурных уравнительных токов.

Значение тока  $\dot{\mathbf{I}}_e$  отвечает токораспределению и потерям активной мощности в однородной ЭЭС. Задача оптимизации потерь мощности в ЭЭС состоит в уменьшении тока  $\dot{\mathbf{I}}'$  и приближении его значения к нулю. Этот ток можно определить следующим образом [3]:

$$\dot{\mathbf{I}}' = \dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{I}}_e = \mathbf{C}\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{C}_r\dot{\mathbf{J}} = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r)\dot{\mathbf{J}}, \quad (2)$$

где  $\dot{\mathbf{J}}$  – вектор задающих токов в узлах ЭЭС;  $\mathbf{C} = \mathbf{z}_b^{-1}\mathbf{M}_t\mathbf{Y}^{-1}$  – матрица токораспределения в ЭЭС;  $\mathbf{C}_r = \mathbf{r}_b^{-1}\mathbf{M}_t\mathbf{Y}_r^{-1}$  – матрица токораспределения в г-схеме замещения ЭЭС;  $\mathbf{z}_b = \mathbf{r}_b + j\mathbf{x}_b$  – диагональная матрица сопротивлений ветвей ЭЭС;  $\mathbf{M}_t$  – транспонированная матрица соединений ветвей в узлах;  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Y}_r$  – матрицы узловых проводимостей соответственно для z-схемы и г-схемы замещения ЭЭС.

Следовательно, задачу уменьшения потерь мощности в ЭЭС можно сформулировать как

$$\dot{\mathbf{I}}' = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r)\dot{\mathbf{J}} \Rightarrow 0. \quad (3)$$

Поскольку матрица  $\mathbf{C}$  комплексная, а матрица  $\mathbf{C}_r$  действительная, то соотношение (3) выполняется при условии, когда  $\mathbf{C} \Rightarrow \mathbf{C}_r$ , то есть

$$\mathbf{C}_p = 0, \quad \mathbf{C}_a = \mathbf{C}_r, \quad (4)$$

где  $\mathbf{C}_a$ ,  $\mathbf{C}_p$  – активная и реактивная составляющие матрицы токораспределения  $\mathbf{C}$ .

Заметим, что первое условие в (4) является необходимым, а второе - достаточным.

Запишем матрицу  $\mathbf{C}$  согласно ее определения и обозначения как в (2) через активные и реактивные сопротивления ветвей и проводимости узлов ЭЭС. Она будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= (\mathbf{g}_b - j\mathbf{b}_b)\mathbf{M}_t(\mathbf{r} + j\mathbf{x}) = \\ &= (\mathbf{g}_b\mathbf{M}_t\mathbf{r} + \mathbf{b}_b\mathbf{M}_t\mathbf{x}) + j(\mathbf{g}_b\mathbf{M}_t\mathbf{x} - \mathbf{b}_b\mathbf{M}_t\mathbf{r}), \end{aligned}$$

где  $\mathbf{g}_b$ ,  $\mathbf{b}_b$  – активная и реактивная составляющие матрицы проводимостей ветвей;  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{x}$  – активная и реактивная составляющие матрицы сопротивлений узлов.

Из последнего выражения следует, что

$$\mathbf{C}_p = (\mathbf{g}_b \mathbf{M}_t \mathbf{x} - \mathbf{b}_b \mathbf{M}_t \mathbf{r})$$

или

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{g}_b (\mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_b \mathbf{r}_b^{-1} \mathbf{M}_t) \mathbf{r}. \quad (5)$$

Выражение, которое находится в скобках в формуле (5), обозначим

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_b \mathbf{r}_b^{-1} \mathbf{M}_t. \quad (6)$$

Последнее выражение является матрицей обобщенных показателей неоднородности ЭЭС. Как видно, значение  $\boldsymbol{\gamma}$  определяется соотношением реактивных и активных составляющих сопротивлений элементов ЭЭС, то есть неоднородностью ее параметров. Размерность этой матрицы определяется количеством ветвей  $n$  и количеством узлов  $m$  ЭЭС.

Из выражения (6) нетрудно убедиться в том, что для однородной ЭЭС, когда для всех ветвей  $x_i/r_i = \text{idem}$ ,  $\boldsymbol{\gamma} = 0$ . То есть, независимо от нагрузки ЭЭС  $\dot{\mathbf{I}}' = 0$  и дополнительные потери, которые вызываются уравнительными токами, в ЭЭС отсутствуют. В других случаях, когда  $x_i/r_i \neq \text{idem}$ ,  $\boldsymbol{\gamma} \neq 0$  и, соответственно,  $\dot{\mathbf{I}}' \neq 0$ . В этих случаях, как известно, с целью компенсации дополнительных потерь в ЭЭС необходимо в контуры вводить уравнительные е.д.с.

### Общесистемные показатели неоднородности ЭЭС

Оценка целесообразности оптимизационных мероприятий в ЭЭС и решение проектных задач связано с анализом большого количества возможных вариантов. Выбор самого лучшего из них должен быть однозначным. Поскольку предложенный показатель  $\boldsymbol{\gamma}$  является многомерным, то без дополнительных условий он не дает однозначной оценки. Таким образом, необходимо ввести общесистемный показатель неоднородности путем приведения матрицы  $\boldsymbol{\gamma}$  к виду числа, поскольку лишь в таком случае обеспечивается возможность объективной оценки близких вариантов. Такой прием использован в [4].

В соответствии с физическим содержанием матрицу  $\boldsymbol{\gamma}$  можно рассматривать как функциональное метрическое множество  $\{\boldsymbol{\gamma}\}$ , которое удовлетворяет аксиомам матричного пространства [5]. Каждая строка данной матрицы является набором координат  $n$ -мерного вектора-столбца е.д.с. ветвей в базисе узловых напряжений, определенных на основе  $r$ -схемы замещения ЭЭС [4]. Таким образом, столбец длин векторов неоднородности ветвей схемы с учетом принятого базиса в соответствии с [5] может быть определен по выражению:

$$|\boldsymbol{\gamma}|_i = \left[ \sqrt{\sum_{j=1}^m \gamma_{i,j}^2} \right]_{i=1,2,\dots,n}. \quad (8)$$

Значения элементов вектора  $|\boldsymbol{\gamma}|$  имеют физический смысл модулей векторов е.д.с. в ветвях, которые формируют уравнительные токи в ЭЭС, и могут быть использованы как индикатор величины влияния параметров каждой отдельной ветви на уровень оптимальности системы в целом.

Для формирования обобщенного показателя неоднородности с целью обеспечения количественной оценки неоднородности ЭЭС в целом рассмотрим две составляющие матрицы  $\boldsymbol{\gamma}$  (6), как составляющие функционального метрического множества  $\{\boldsymbol{\gamma}\}$  [5]. Метризация множества  $\{\boldsymbol{\gamma}\}$  позволяет количественно определить величину неоднородности ЭЭС через расхождение между неоднородностью, приведенной к

узлам схемы ЭЭС, и неоднородностью ветвей, распределенной по узлам ЭЭС. Это значение может быть определено через евклидовую норму матрицы  $\gamma$ :

$$d\gamma = \rho(\mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1}, \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{i,j}^2}. \quad (9)$$

Значение  $d\gamma$  является общесистемным показателем неоднородности ЭЭС. Этот показатель дает возможность оценить влияние изменения топологии и параметров системы на оптимальность режимов ЭЭС. Диапазон его значений для исследуемой ЭЭС в соответствии с [5] определяется:

$$0 \leq d\gamma \leq d\gamma_{\max},$$

$$\text{где } d\gamma_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (M_{ji} x_{ij} r_{ij}^{-1})^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{vij} r_{vij}^{-1} M_{ji})^2}.$$

Для контроля изменений уровня неоднородности состояния ЭЭС в процессе оптимизации параметров системы за счет проведения того или иного мероприятия целесообразно перейти к относительным оценкам:

$$d\gamma_* = \frac{d\gamma}{d\gamma_0}, \quad (10)$$

где  $d\gamma_0$  – значение общесистемного показателя неоднородности для базовой схемы, то есть до внесения оптимизационных изменений.

Для оценки потенциальных возможностей оптимизационных мероприятий по реконструкции ЭЭС, то есть определение, насколько текущее состояние системы далеко от однородного, а также для возможности сравнения электрических систем с различной топологией целесообразно пользоваться относительным показателем неоднородности:

$$\delta\gamma = d\gamma / d\gamma_{\max}.$$

Его значения находятся в границах:

$$0 \leq \delta\gamma \leq 1.$$

Энергосистема имеет тем большую неоднородность, чем ближе значение относительного показателя неоднородности к верхней границе  $\delta\gamma_{\max}=1$ .

### Применение общесистемных показателей неоднородности

На рис. 1, в качестве примера, показано графическое представление элементов вектора  $|\gamma|$  для схемы 110-750 электроэнергетической системы НЭК Украины, с которого видно, что влияние параметров ветвей на оптимальность режимов ЭЭС неодинаково (отличается на порядок и больше).

Из результатов ранжирования ветвей ЭЭС по мере их влияния на неоднородность системы в целом (рис. 2) видно, что наиболее существенное влияние наблюдается со стороны линий 518-404, 543-515 и 402-403, то есть реконструкция как раз этих линий приведет к самому большому общесистемному эффекту.

Уменьшение значения  $d\gamma$  отвечает улучшению состояния системы, то есть приближению ее к однородности. Относительное значение  $d\gamma_*$  показывает, насколько эффективным является оптимизационное мероприятие.

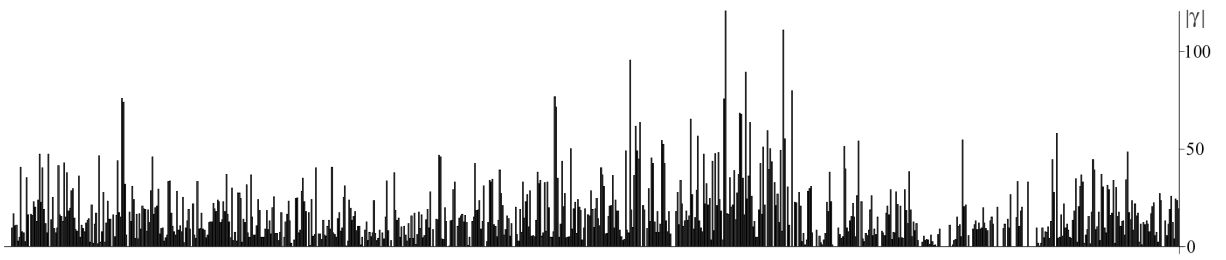


Рис. 1. Графическое представление вектора  $|\gamma|$  весовых коэффициентов влияния ветвей электроэнергетической системы НЭК Украины

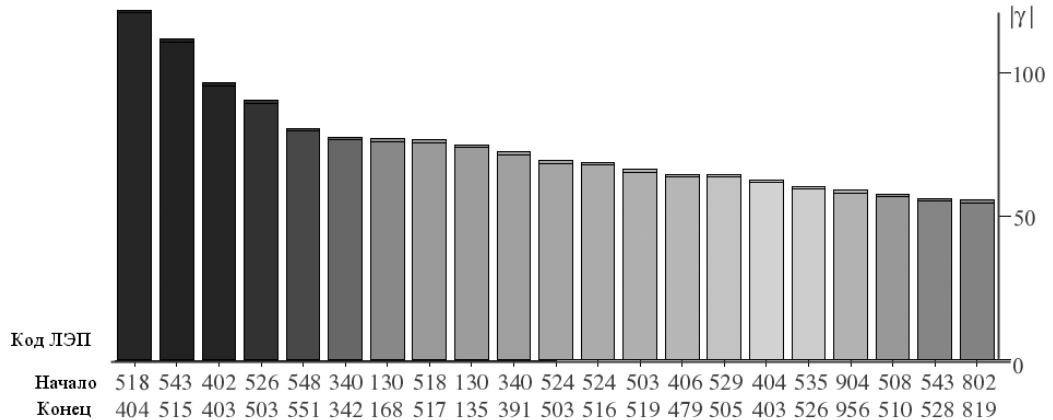


Рис.2. Результаты ранжирования ветвей электрических сетей ЭЭС НЭК Украины по мере влияния на неоднородность системы (20 наиболее влиятельных ветвей)

Например, на рис. 3 показана зависимость  $d\gamma^*$  от относительного индуктивного сопротивления линии 518-404  $d\gamma^*=f(x_{л*})$ . Такую зависимость можно использовать для определения оптимальных параметров устройств продольной компенсации. Минимальное значение функции  $d\gamma^*=f(x_{л*})$  соответствует оптимальному значению емкостного сопротивления УПК.

Так, для линии 518-404 оптимизация параметров требует компенсации 18% индуктивного сопротивления, то есть установление УПК с  $x_c = 4,9$  Ом. Внедрение такого мероприятия обеспечит примерно на 2% снижение неоднородности системы в целом. Результаты анализа неоднородности исходной и оптимизированной схем ЭЭС представлены в таблице.

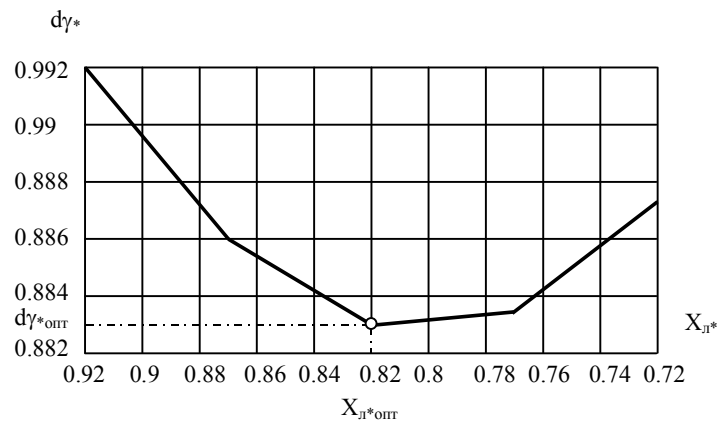


Рис. 3. Определение оптимального реактивного сопротивления ветви 518-404 с целью установки УПК

Таблица - Результаты анализа неоднородности ЭЭС НЭК Украины

Состояние схемы ЭЭС	Общесистемный показатель $d\gamma$	Максимальное значение $d\gamma_{\max}$	Относительный показатель $\delta\gamma, \%$
Исходная схема ЭЭС	635.309	1530	41.536%
После установки УПК в линии 518-404	624.509	1528	40.871%

### Компенсация неоднородности ЭЭС в процессе эксплуатации

На основании закономерностей, установленных выше и в [4], построены САУ в составе системы оптимального управления нормальными режимами ЭЭС. Подробно особенности их функционирования рассмотрены в [6]. Здесь только отметим, что управление коэффициентами трансформации трансформаторов осуществляется в соответствии с законами оптимального управления [4]:

$$\mathbf{k}'(t) = 1 - \pi_a^E \mathbf{J}_{*p}^E(t), \quad \mathbf{k}''(t) = -\pi_p^E \mathbf{J}_{*a}^E(t),$$

где  $\mathbf{k}'(t), \mathbf{k}''(t)$  – векторы действительных и мнимых составляющих коэффициентов трансформации трансформаторов;  $\pi_a^E, \pi_p^E$  – матрицы критериев подобия;  $\mathbf{J}_{*a}^E(t), \mathbf{J}_{*p}^E(t)$  – векторы активных и реактивных составляющих относительных значений токов в узлах.

Матрицы критериев подобия определяются по формулам [4]:

$$\pi_a^E = -[\mathbf{E}_{зпа}^{(6)}]_{Д}^{-1} \mathbf{v} \mathbf{r}_B \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_p^6]_{Д}; \quad \pi_p^E = [\mathbf{E}_{зрр}^6]_{Д}^{-1} \mathbf{v} \mathbf{r}_B \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_a^6]_{Д},$$

где  $\mathbf{v} = \mathbf{N}_\alpha \mathbf{x}_{в\alpha} \mathbf{r}_{в\alpha}^{-1} - \mathbf{x}_к \mathbf{r}_к^{-1} \mathbf{N}_\alpha$  – матрица системных показателей неоднородности ЭЭС;  $\mathbf{r}_{в\alpha}, \mathbf{x}_{в\alpha}$  – диагональные матрицы сопротивлений ветвей дерева схемы;  $\mathbf{r}_к, \mathbf{x}_к$  – матрицы сопротивлений контуров;  $\mathbf{M}_\alpha, \mathbf{N}_\alpha$  – матрицы соединений ветвей в узлах и контурах для дерева схемы.

Заметим, что значения элементов матрицы показателей неоднородности  $\mathbf{v}$  в отличие от матрицы  $\gamma$  зависят от выбранной системы контуров. Это сделано для того, чтобы упростить формирование и сделать процесс определения оптимальных контурных э.д.с. с помощью трансформаторов с РПН и ВДТ управляемым.

### Выводы

1. С помощью предложенных общесистемных показателей неоднородности можно оценить влияние изменения топологии ЭЭС, введение новых линий электропередачи, УПК и трансформаторов на оптимальность режимов ЭЭС. Ими можно воспользоваться для проведения целенаправленной реконструкции ЭЭС с целью уменьшения меры ее неоднородности, то есть последовательного устранения первопричины неоптимальности режимов и создание, таким образом, условий самооптимизации потокораспределения в электроэнергетических системах.

2. При автоматизации оптимального управления потоками мощности и напряжением в ЭЭС возможно и целесообразно применять методы теории подобия и моделирования. На основе их можно решать задачи, характерные для АСДУ, на единых методологических принципах на всех этапах оптимального управления. Такой подход разрешает построить адаптивные САУ с децентрализацией части функций АСДУ практически без нарушения принципов централизованного управления.

### Литература

1. Кузнецов В. Г., Тугай Ю.И., Баженов В.А.. Оптимизация режимов электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
2. Чебан В.М., Ландман А.К., Фишов А.Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях. – М.: Высшая школа, 1990. – 144 с.
3. Лежнюк П.Д., Ярных Л.В. Расчет токораспределения в электрической сети // Электричество. - 1982. - №8. – С. 10-14.
4. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Пауткіна Л.Р. Моделювання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режимів // Вісник ВПІ. – 1996. - №4. – С. 44-49.
5. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления.– М.: Наука, 1984.– 320 с.
6. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Кравцов К.І. Моделювання та формування умов самооптимізації режимів електроенергетичної системи // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. ч.3. – 2002. - С. 96-101.