

## НЕСИММЕТРИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 750 КВ ОЭС УКРАИНЫ В НЕПОЛНОРЕАКТОРНЫХ РЕЖИМАХ

*Представлена математична модель електричної мережі на основі рівнянь в фазних координатах, що дозволяє відтворювати несиметричні режими при наявності в мережі як простої (одномісної), так і складної (багатомісної) несиметрії. Виконані дослідження складної несиметрії в електричних мережах 750 кВ ОЕС України, зумовленої неповнофазними включеннями груп шунтуючих реакторів.*

*Представлена математическая модель электрической сети на основе уравнений в фазных координатах, позволяющая воспроизводить несимметричные режимы при наличии в сети как простой (одноместной), так и сложной (многоместной) несимметрии. Выполнены исследования сложной несимметрии в электрических сетях 750 кВ ОЭС Украины, обусловленной неполнофазными включениями групп шунтирующих реакторов.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Электрическая сеть 750 кВ ОЭС Украины при общей протяженности ВЛ этого класса около 3000 км является источником значительной реактивной мощности, и ее избыток, особенно в минимальных режимах, является причиной повышения напряжений в системообразующих сетях. Для компенсации зарядной мощности ВЛ на объектах сети 750 кВ ОЭС установлены 28 групп (84 фазы) шунтирующих реакторов (ШР), которых для обеспечения баланса реактивной мощности вполне достаточно. Однако проблема обеспечения технически допустимых уровней напряжения остается актуальной из-за высокой аварийности шунтирующих реакторов, установленных на объектах ОЭС, и выходом из положения является вынужденное использование режимов с неполнофазными включениями групп ШР (неполнореакторных).

Анализ продолжительности использования ШР показывает [1], что в неполнофазных режимах могут находиться одновременно несколько (до 7-8 из 28) групп ШР (на разных ВЛ и в разных фазах). Коэффициент участия ШР в рабочем (полнофазном) режиме при этом составляет 0.67-0.7 и, учитывая высокую степень сработки ресурса, имеет тенденцию дальнейшего снижения. Исходя из этого следует рассматривать реальные режимы работы системообразующей сети 750 кВ ОЭС Украины с неполнофазными включениями групп ШР (неполнореакторные) как режимы со сложной (многоместной) несимметрией.

Расчеты эксплуатационных стационарных режимов электрических сетей, как правило, выполняются в предположении о том, что все элементы сети и все нагрузки симметричны. При этом допущении задача значительно упрощается, так как если считать, что все три фазы находятся в одинаковых условиях, то расчет достаточно выполнить на одну фазу. Однако в тех случаях (включая и рассматриваемый), когда в сети имеются источники несимметрии, вопросы о том, насколько справедливо принятое допущение, какова степень несимметрии, как она соотносится с величиной, допустимой ГОСТ на качество электроэнергии, и

можно ли вообще рассматривать расчетные режимы как симметричные, остаются открытыми, так как математические модели, и тем более, программные средства, обеспечивающие решение этой задачи и с требуемой точностью (2-4%), отсутствуют.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для решения этих вопросов расчеты стационарных режимов необходимо выполнять, рассматривая сеть как трехфазную, с несимметричными элементами, однако разработка трехфазных моделей (в фазных координатах) значительно более трудоемка, поэтому такие модели, если и разрабатываются, то только как узко специализированные [2, 3], для отдельных задач (расчет неполнофазного режима электропередачи, наведенных напряжений и т. п.).

Отсутствие моделей в фазных координатах уже становится фактором, сдерживающим решение целого ряда задач. Как подтверждение этого можно рассматривать появление целого ряда работ [4, 5], направленных на то, чтобы представить трехфазные схемы замещения сетей с несимметрией, как и однофазные схемы замещения в симметричных режимах, набором резистивных, индуктивных и емкостных элементов, для которых применимы (с некоторыми модификациями) существующие алгоритмы и программы расчетов режимов симметричных трехфазных систем. Для этого предлагается трехфазные элементы (ВЛ, КЛ, трансформаторы) представлять решетчатыми схемами замещения из  $RLC$ -элементов или синтезировать из схем в симметричных составляющих. В наиболее распространенном прикладном пакете SimPowersystems трехфазные трансформаторы моделируются путем объединения группы моделей однофазных трансформаторов. Там же используются модели трехфазных линий в виде простой П-образной модели или же в виде отрезков длинных линий.

Количество работ, направленных на разработку моделей в фазных координатах, невелико, что связано как с уже отмеченными выше сложностями, так и с тем, что попытки применения старых методов к новым задачам не дают желаемого эффекта.

**Цель, задачи исследования.** При высокой сте-

пени аварийности ШР из-за сработки ресурса наличие сложной несимметрии в сетях 750 кВ становится реальностью и для принятия решений о возможности и степени использования таких режимов необходимо иметь количественные оценки влияния неполнореакторных режимов на показатели качества электроэнергии. Для получения таких оценок необходимы, во-первых, разработки математических моделей, позволяющих воспроизводить режимы сети при наличии в ней произвольного количества несимметричных элементов (применительно к рассматриваемой задаче – произвольного количества неполнофазных и несимметричных групп реакторов в разных узлах сети и с различными аварийными фазами) и, во-вторых, возможно более полные исследования таких режимов.

Исходя из этого для разработки средств моделирования стационарных режимов работы энергосистемы с электропередачами 750 кВ, длительно работающими с неполными комплектами ШР, принята формулировка задачи математического моделирования стационарных режимов в обобщенной постановке [6], и выполнены исследования неполнореакторных режимов электрических сетей 750 кВ ОЭС Украины как режимов со сложной несимметрией.

#### ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Математическая модель стационарных режимов электрических сетей со сложной несимметрией реализована на основе уравнений в фазных координатах, которые при принятой в модели форме представления элементов трехфазными многополюсниками имеют блочную структуру.

Уравнения в фазных координатах относятся к электрической сети, содержащей трехфазные многополюсные элементы. Все элементы трехфазной сети характеризуются параметрами режима – токами, напряжениями, ЭДС фаз

$$[I]_{ij}^F = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{ij} ; [U]_{ij}^F = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}_{ij} ; [E]_{ij}^F = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_{ij} ,$$

и матрицами собственных и взаимных сопротивлений фаз

$$[Z]_{ij}^F = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{ij} ,$$

где диагональные элементы  $Z_{aa}$ ,  $Z_{bb}$ ,  $Z_{cc}$  отражают параметры (активные, индуктивные, емкостные) соответствующих фаз, а недиагональные – взаимное влияние фаз.

Воздушные линии в несимметричных режимах, как и в симметричных, можно представить П-образной схемой замещения, которая в отличие от расчетов на одну фазу, содержит трехфазные продольные и поперечные ветви. Поэтому в уравнениях баланса токов и напряжений в такой схеме фигурируют не численные значения параметров схемы и ре-

жима линии, а соответствующие матрицы и векторы третьего порядка. Так, для одноцепной линии без трасс уравнения баланса токов и напряжений можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{AB} & \alpha_{AC} \\ \alpha_{BA} & \alpha_{BB} & \alpha_{BC} \\ \alpha_{CA} & \alpha_{CB} & \alpha_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix},$$

где  $[I]$ ,  $[U]$  – токи и напряжения фаз;  $[Z]$ ,  $[\alpha]$  – матрицы собственных и взаимных продольных и поперечных параметров фаз ВЛ размером  $3 \times 3$ , или в виде, разрешенном относительно токов фаз

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{AA} & y_{AB} & y_{AC} \\ y_{BA} & y_{BB} & y_{BC} \\ y_{CA} & y_{CB} & y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{B0} \\ I_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{AA0} & y_{AB0} & y_{AC0} \\ y_{BA0} & y_{BB0} & y_{BC0} \\ y_{CA0} & y_{CB0} & y_{CC0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}.$$

Переход к уравнениям элементов, разрешенным относительно токов, необходим для формирования узловых уравнений в форме баланса токов.

Компонентные уравнения элементов трехфазной сети в фазных координатах имеют вид:

- для продольных ветвей

$$[Z]_{ij}^F [I]_{ij}^F = ([U]_i^F - [U]_j^F), \quad (3)$$

- для поперечных ветвей

$$[Z]_{Hi}^F [I]_{Hij}^F = [U]_i^F, \quad (4)$$

- для ветвей с источником ЭДС

$$[Z]_{\partial i}^F [I]_{\partial i}^F = ([U]_{\partial i}^F - [E]_{\partial i}^F) \quad (5)$$

Матрицы как продольных  $[Z]_{ij}$  так и поперечных  $[Z]_{i0}$  элементов могут быть несимметричными, симметричными или, в частном случае (группа однофазных элементов) диагональными. Все виды продольной и поперечной несимметрии (нетранспонированные, неполнофазные ВЛ, несимметричные нагрузки и др.) отражаются в матрицах параметров  $[Z]$  соответствующих элементов.

Трехфазной сети можно поставить в соответствие граф, ветвям которого соответствуют трехфазные ветви, а узлам – трехфазные узлы. Тогда для трехфазных контуров и трехфазных узлов законы Кирхгофа можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^{N-1} [I]_{ij}^F = 0; \quad \sum_{i=1}^{N_k} [\Delta U]_{ij}^F = 0, \quad (6)$$

где  $[I]_{ij}$  и  $[U]_{ij}$  – соответственно токи в ветвях, примыкающих к трехфазному узлу, и падения напряжения в трехфазных ветвях, образующих замкнутый контур в трехфазной сети.

Если для всех независимых трехфазных узлов электрической сети составить уравнения баланса то-

ков, разрешить компонентные уравнения трехфазных ветвей, примыкающих к каждому из узлов, относительно токов и подставить их в первое из уравнений (6), то для сети, содержащей  $n$  независимых трехфазных узлов, получим систему уравнений электрической сети в несимметричном стационарном режиме в фазных координатах

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}^F \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix}^F = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_n \end{bmatrix}^F. \quad (7)$$

Элементами этой системы уравнений являются матрицы собственных  $[Y_{ii}]$  и взаимных  $[Y_{ij}]$  проводимостей трехфазных узлов размером  $3 \times 3$ , векторы напряжений фаз в узлах трехфазной сети  $[U_i]$  и трехфазные задающие токи  $[J_i] = [Y_{ii}][E_i]$  в узлах подключения генерирующих элементов.

Все несимметричные аварийные повреждения в электрической сети – отключения фаз, короткие замыкания отдельных фаз между собой и на землю и др. могут быть достаточно просто отражены при формировании узловых уравнений (7) с учетом соответствующих коммутаций в узлах и ветвях трехфазной сети. Причем наличие нескольких несимметричных повреждений не приводит к каким-либо осложнениям алгоритмов формирования и решения узловых уравнений по сравнению со случаем одноместных повреждений. Поэтому математические модели, основанные на уравнениях в фазных координатах, более гибки и универсальны – применимы для анализа режимов как с простой, так и со сложной несимметрией.

В линейной модели сети (при задании нагрузок неизменными сопротивлениями фаз  $Z_n = \text{const}$ ) напряжения фаз в узлах сети в рассматриваемом несимметричном режиме определяются однократным решением уравнений (7), в нелинейной модели (при заданных мощностях, потребляемых и генерируемых в узлах сети) напряжения и токи фаз уточняются в ходе итерационного процесса до тех пор, пока сумма мощностей трех фаз в каждом узле сети не станет равна заданной величине.

Разработанная модель реализована в виде программы AnFaz1 на алгоритмическом языке Delphi. Программа предназначена для моделирования электрических сетей произвольной конфигурации в стационарных несимметричных режимах – аварийных и эксплуатационных, с простой и сложной несимметрией.

Основные вычислительные процедуры программы обеспечивают:

- расчет параметров элементов сети в фазных координатах и формирование моделей элементов;
- формирование узловых уравнений электрической сети в фазных координатах;
- топологический анализ схемы электрической сети и определение порядка исключения неизвестных;
- решение системы узловых уравнений сети методом двойной блочной факторизации.

Для хранения только ненулевых элементов слабо заполненных матриц в памяти ЭВМ и организации вычислений только с ненулевыми элементами матрицы узловых проводимостей использованы связанные списки, модифицированные для матриц блочной структуры. Топологический анализ схемы сети, выполняемый перед началом вычислений, позволяет определить близкий к оптимальному порядок исключения узлов сети.

Элементы сети могут быть заданы как симметричными, так и несимметричными параметрами, соотношение между числом симметричных и несимметричных элементов в пределах сети может быть произвольным. Кроме того, может быть задано произвольное число несимметричных повреждений (несимметричных КЗ, отключенных фаз) элементов.

С использованием программы AnFaz1 выполнены расчеты несимметричных режимов сети 750 кВ ОЭС Украины при наличии несимметричных и неполнофазных групп реакторов.

В расчетную схему, принятую для расчетов нормальных и неполнореакторных режимов электрических сетей 750 кВ (рис. 1), включены все ВЛ 750 кВ, понижающие трансформаторы и автотрансформаторы 750/330 кВ, шины 330 кВ подстанций и шины генераторного напряжения электростанций. Для учета распределенности параметров в расчетах режимов линии разбиты на участки длиной не более 100 км.

Работа сети 750 кВ с неполными (из-за аварийных отключений) группами реакторов приводит к несимметрии параметров режима сети. Причем степень несимметрии зависит как от количества аварийно отключенных ШР, так и их распределения в сети и по фазам. Для оценки степени влияния этих факторов с использованием программы AnFaz1 выполнены многовариантные расчеты несимметричных режимов сети при наличии неполных групп реакторов и вариациях количества отключенных ШР, их размещения в сети, сочетания аварийных фаз. Влияние аварийных отключений ШР иллюстрируют приведенные ниже результаты для четырех из рассмотренных неполнореакторных режимов:

- режим № 1, при отключении реактора фазы А на одной из ВЛ п/ст ЗАЭС-750 (узел 46),
- режим № 2, при отключенных реакторах фазы А на двух ВЛ п/ст ЗАЭС - 750,
- режим № 3 – при отключенных реакторах в фазе А на трех ВЛ п/ст ЗАЭС,
- режим № 4 – при отключенных реакторах в одной фазе ВЛ на п/ст ЗАЭС-750, п/ст ЮД-750 (узел 45), п/ст Донбасс-750 (узел 44).

Основные результаты расчета для одного из режимов представлены в табл. 1.

В соответствии с полученными результатами при аварийном отключении одной из фаз группы шунтирующих реакторов на шинах 750 кВ ЗАЭС коэффициенты несимметрии напряжений максимальны на шинах этой подстанции и равны:

- 0,21 % по обратной последовательности;

- 0,28 % по нулевой последовательности, что не превышает значений, допустимых по ГОСТ на качество электроэнергии [7].

При отключениях 2-3 реакторов и более, что с учетом существующего уровня сработки ресурса

шунтирующих реакторов вполне вероятно, в представленных режимах коэффициенты несимметрии увеличиваются соответственно до 2,2 % и 3,8 %, что близко к предельным допустимым значениям.

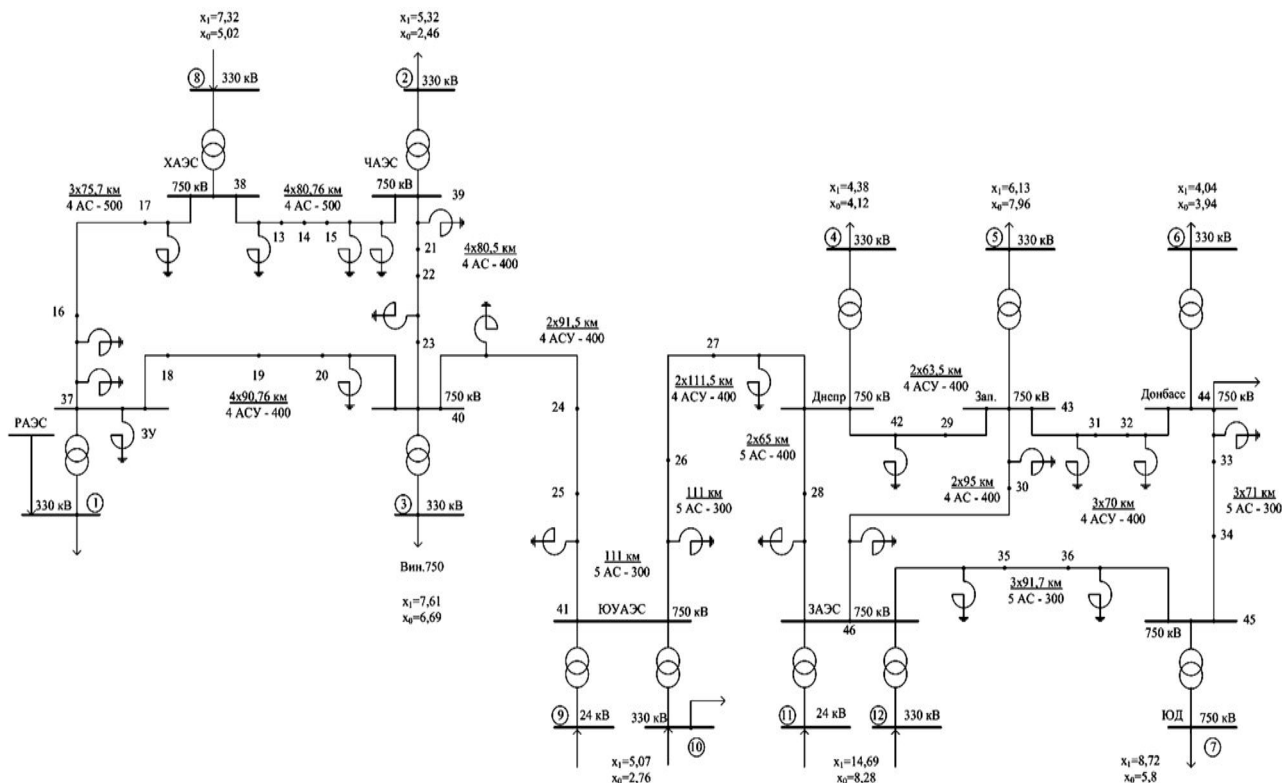


Рис. 1. Расчетная схема электрических сетей 750 кВ ОЭС Украины

Таблица 1

Режим № 4. Напряжения фаз и коэффициенты несимметрии напряжений.

Узлы	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_2$	$U_0$	$K^{(2)}$	$K^{(0)}$
37	387,41	387,53	387,93	0,29	0,03	0,066	0,008
38	398,48	398,57	398,79	0,18	0,01	0,040	0,002
39	386,23	386,36	386,80	0,32	0,04	0,073	0,008
40	393,32	393,46	394,21	0,47	0,11	0,108	0,024
41	408,59	408,68	410,22	0,77	0,36	0,176	0,083
42	398,24	397,38	407,21	3,32	3,22	0,766	0,743
43	390,02	388,32	404,44	4,79	5,68	1,106	1,311
44	373,28	370,11	410,54	9,60	16,44	2,215	3,797
45	391,65	387,41	426,96	9,14	16,24	2,111	3,750
46	418,50	417,98	427,31	2,95	3,27	0,681	0,755

Длительные воздействия несимметрии параметров режима, как известно, могут приводить к отрицательным последствиям для генераторов электростанций, для электроприемников, трансформаторов и другого оборудования энергосистемы.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая математическая модель позволяет воспроизводить несимметричные режимы при наличии в сети как простой (одноместной), так и сложной (многоместной) несимметрии и исследовать влияние факторов, влияющих на степень искажения симметрии напряжений в сети с простой и сложной несимметрией, что другими известными моделями не реализуемо.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что:

- в рассмотренном в качестве расчетного режиме электрических сетей 750 кВ ОЭС Украины и при принятых расчетных условиях при отключении одной из фаз группы шунтирующих реакторов и на одной из подстанций 750 кВ несимметрия напряжений не превышает значений, допустимых по ГОСТ на качество электроэнергии;

- аварийные отключения двух-трех фаз ШР (в разных узлах сети), что при существующем уровне их аварийности вполне вероятно, приводят к значениям коэффициентов несимметрии напряжений, близким к предельно допустимым по ГОСТ на качество электроэнергии;

- степень искажения симметрии напряжений в сети при аварийных отключениях ШР зависит от ряда факторов: количества и размещения аварийных ШР в сети, сочетания аварийных фаз, передаваемой мощности по ВЛ с неполными комплектами ШР;

- напряжения фаз с отключенными реакторами повышаются, поэтому необходимо либо снижать уровень напряжения в сети (что приводит к увеличению потерь и снижению пределов передаваемой мощности), либо допускать длительные режимы с повышенными напряжениями отдельных фаз, либо, наконец, ограничивать длительность неполнореакторных ре-

жимов. Для решения этих вопросов необходимы дополнительные исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка мероприятий по нормализации уровней напряжения в системообразующих сетях ОЭС Украины. 1 этап. Укрэнергопроект, 2003 г.
2. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов и др. // Электрические станции. – 2000. – № 2. – С. 19-24.
3. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений / М.Ш. Мисриханов и др. // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 47-55.
4. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов трехфазных трансформаторов. Ч.1 / В.А. Мартынов // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 28-35.
5. Закарюкин В.П. Расчеты режимов электрических систем при сложных видах несимметрии / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков / Иркутский государственный университет путей сообщения. – 197 с. – Деп. ВИНТИ 30.09.2004, № 1546-В2004.
6. Веприк Ю.Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке / Ю.Н. Веприк // Электротехника і електро-механіка. – 2010. – № 3. – С. 59-61.
7. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость электрических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Razrabotka meropriyatij po normalizacii urovnej napryazheniya v sistemoobrazuyuschih setyah O`ES Ukrainy. 1 `etap. Ukr`energohet`proekt, 2003 g. 2. K raschetu navedennogo napryazheniya na remontiruemyh liniyah `elektroperedachi / M.Sh. Misrihanov i dr. // `Elektricheskie stancii. - 2000. - № 2. - S. 19-24. 3. Modelirovanie vozdushnyh liniy `elektroperedachi dlya rascheta navedennyh napryazhenij / M.Sh. Misrihanov i dr. // `Elektricheskie stancii. - 2003. - № 1. - S. 47-55. 4. Martynov V.A. Raschet nepolno-

faznyh rezhimov trehfaznyh transformatorov. Ch.1 / V.A. Martynov // `Elektrichestvo. - 2003. - № 9. - S. 28-35. 5. Zakaryukin V.P. Raschety rezhimov `elektricheskikh sistem pri slozhnyh vidah nesimmetrii / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov / Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobscheniya. - 197 s. - Dep. VINITI 30.09.2004, № 1546-V2004. 6. Veprik Yu.N. Zadacha matematicheskogo modelirovaniya stacionarnykh rezhimov `elektricheskikh sistem v obobshchenoj postanovke / Yu.N. Veprik // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 3. - S. 59-61. 7. GOST 13109-97. Mezhhgosudarstvennyj standart. `Elektricheskaya `energiya. Sovmestimost' `elektricheskikh sredstv `elektromagnitnaya. Normy kachestva `elektricheskoy `energii v sistemah `elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. - Kiev: Gosstandart Ukrainy, 1999. - 31 s.

*Поступила 20.03.2012*

*Веприк Юрий Николаевич, д.т.н., проф.*  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
каф. передач электрической энергии  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076246

*Линник Елена Николаевна, директор*  
Проектно-изыскательский и научно-исследовательский  
институт "Укрэнергопроект"  
Харьков, Красношкільна набережна, 2

*Veprik Yu.N., Linnik E.N.*

#### **750 kV electric network parameters asymmetry in the Ukrainian united power grid under incomplete reactor conditions.**

The paper presents a phase coordinate equation based mathematical model of an electrical network that allows reproducing single-ended modes under single or multiple asymmetry in the network. Studies of the complex unbalance in 750 kV electric networks in the Ukrainian united power grid are made, the unbalance resulted from open-phase switching of shunt reactors groups.

**Key words – stationary modes, electric network, single-ended mode, mathematical model.**