

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Благинин В.А., Кажескин И.Е. (ФГБОУ ВПО Калининградский Государственный Технический Университет, Калининград)

Введение. Проблема выбора режима нейтрали и возможные пути ее решения

Существование проблем рационального выбора режима нейтрали обусловлено тем, что в условиях эксплуатации электросистем число однофазных замыканий на землю, как правило, во много раз превосходит совокупное количество всех остальных замыканий, вместе взятых. Ясно, что в этих условиях любая электросистема не сможет удовлетворительно работать без надежного обеспечения ее безопасности в режиме однофазного замыкания на землю. Наиболее эффективным и универсальным способом управления безопасностью сетей при однофазных замыканиях следует признать правильный подбор «наилучшего» режима заземления нейтрали. Альтернативные варианты защиты не могут конкурировать с рационально выбранным и правильно примененным режимом нейтрали ни по многообразию его защитных действий, ни по широте **охвата** используемого в электросистеме оборудования, ни по простоте большинства реализующих его устройств, ни по экономической эффективности финансовых вложений, производимых для его применения. Особенно простым и малозатратным в реализации является режим изолированной нейтрали, что и определило его широкое распространение в общепромышленных и автономных электросистемах.

Изменение режима нейтрали приводит к одновременному изменению целого ряда разнородных показателей как в сторону из улучшения, так и в сторону ухудшения. Важнейшими из них являются показатели бесперебойности электроснабжения потребителей, а **также** ток однофазного замыкания на землю и уровень максимальных перенапряжений. Основная трудность выбора и нормирования режима нейтрали обусловлена тем, **что** изменение режима нейтрали приводит к одновременному изменению всех этих показателей, причем увеличение одного из двух последних показателей практически всегда происходит одновременно с уменьшением другого из них. Для упрощения выбора режима нейтрали его обычно производят только по одному из двух последних показателей, который для данного класса напряжений U_n признается наиболее важным, а бесперебойность **питания** потребителей принимается одинаковой для всей группы неэффективно заземленных нейтралей или для всех нейтралей с эффективным заземлением. В то же время, оценка уровня безопасности сетей в режиме однофазного замыкания на землю требует одновременного учета всех важнейших показателей. В противном случае принятый режим нейтрали может отличаться от «наилучшего», найденного на основе комплексного подхода к оценке его защитной эффективности. В результате не в полной мере будут использованы имеющиеся возможности по повышению надежности и безопасности электрооборудования, а эксплуатирующее его предприятие понесет потери, которых можно было бы избежать.

Вместе с тем, в литературе практически никогда не излагались процедуры, позволяющие реализовывать комплексный подход к выбору и нормированию режима нейтрали и предусматривающие одновременный учет хотя бы двух важнейших показателей опасности замыканий на землю. Исключение составляет, пожалуй, лишь работа профессора Обабкова В.К. [1], в которой не только указывается на необходимость применения процедуры многофакторного выбора и нормирования режима нейтрали, но и предлагается интересный подход на основе использования обобщенного критерия в виде многомерного вектора. К сожалению, о дальнейшем развитии этого подхода нам ничего не известно. Предлагаемая нами работа имеет ту же направленность. Она показывает один из возможных путей

комплексной оценки защитной эффективности отдельных режимов нейтрали. Его применение позволяет формировать некоторый обобщенный показатель эффективности для каждого из сопоставляемых видов нейтрали и по его числовым значениям осуществлять ранжирование этих режимов нейтрали по их защитной эффективности в электросистемах. Это, в свою очередь, позволит проводить выбор и нормирование режима нейтрали на основе накапливаемых данных о самопроизвольных отключениях потребителей и об уровнях токов и перенапряжений, наблюдающихся при тех или иных режимах нейтрали.

Обобщенный показатель защитной эффективности режима нейтрали

В предлагаемой работе комплексный подход к выбору режима нейтрали сводится к учету основных видов угроз, сопровождающих замыкание на землю, осуществляемого путем формирования некоторого обобщенного показателя эффективности, для каждого k -го способа заземления нейтрали \mathcal{E}_k . Формирование показателя эффективности проводится в соответствии с формулой:

$$\mathcal{E}_k = \sum_i \mu_i \cdot X_{i,k}, \quad (1)$$

где μ_i - весовой коэффициент i -го вида угрозы;

$X_{i,k}$ - относительный показатель степени предотвращения i -го вида угрозы при использовании k -го режима нейтрали.

Оценка весовых коэффициентов должна основываться на некотором обобщенном мнении группы экспертов, установленном по определенной процедуре. Для этого проводится формализованный опрос, в ходе которого эксперты попарно сравнивают между собой уровни опасности отдельных видов угроз, связанных с однофазными замыканиями на землю. При этом более важным признается тот вид угрозы, который с позиции рассматриваемой сети может привести к более тяжелым последствиям по сравнению с другим сопоставляемым в паре видом угроз. По результатам опроса каждого j -го эксперта определяется число сделанных им выборов по степени важности каждой из рассматриваемых угроз. Далее для некоторого i -го вида угрозы вычисляется его весовой коэффициент μ_i . Он равен:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^m Z_{i,j}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Z_{i,j}}, \quad (2)$$

где $Z_{i,j}$ - число выборов i -го показателя j -м экспертом,
 m - общее число i -х показателей,
 n - общее число j -х экспертов.

О достоверности полученных результатов можно судить по степени совпадения мнений его участников. Оно оценивается по величине коэффициента конкордации, равного

$$w = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2 \cdot (n^3 - n) + m \cdot \sum_{j=1}^n T_j}, \quad (3)$$

где

$$S = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m Z_{ij} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot (n+1) \right\}^2, \quad (4)$$

$$T_j = \frac{1}{12} \cdot \sum_{t_j} (t_j^3 - t_j), \quad (5)$$

t_j – число повторений каждого ранга в ранжировке, полученной по результатам опроса j -го эксперта.

При полном совпадении мнений экспертов коэффициент конкордации равен 1, а при их полном расхождении – 0. Хорошо согласованными считаются опросы, в которых коэффициент конкордации превышает 0.5.

Для вычисления эффективности k -го режима нейтрали \mathcal{E}_k необходима оценка показателя относительной степени предотвращения i -го вида угрозы при его использовании $X_{i,k}$, которая также определяется путем попарного сравнения возможностей сопоставляемых режимов нейтрали. Сравнение следует проводить по наибольшим значениям показателей опасности, достигаемых при использовании рассматриваемых режимов нейтрали. Если один из этих режимов, например, k -ый в сравнении в $(k+n)$ -ым обеспечивает меньшую величину показателя степени опасности, то приоритет отдается k -му режиму нейтрали и для него показатель $X_{i,k}$ принимается равным 1. Если же в сопоставляемой паре выявить более предпочтительный режим нейтрали затруднительно, то оба показателя получают по 0.5 балла. Далее для каждого режима нейтрали подсчитывается суммарное количество баллов. Это число и является относительной степенью предотвращения i -го вида угрозы при использовании k -го способа заземления нейтрали. В этом случае показатель \mathcal{E}_k определяется в некоторых абсолютных величинах. Если же суммарное количество баллов разделить на общее число сравнений, то \mathcal{E}_k определяется в относительных единицах.

Значения весовых коэффициентов отдельных видов угроз и показателей опасности

На основе описанной методики было проведено сравнение различных режимов нейтрали и построен ранжированный ряд показателей опасности однофазных замыканий на землю. Опрос был проведен в приложении к автономным сетям низкого напряжения. В нем экспертами выступили специалисты, занимающиеся исследованиями, разработкой, надзором и эксплуатацией судовых электросистем. Полученные в результате весовые коэффициенты позволили сравнить между собой различные виды угроз по степени их важности. Их ранжированный ряд приведен на рисунке 1.

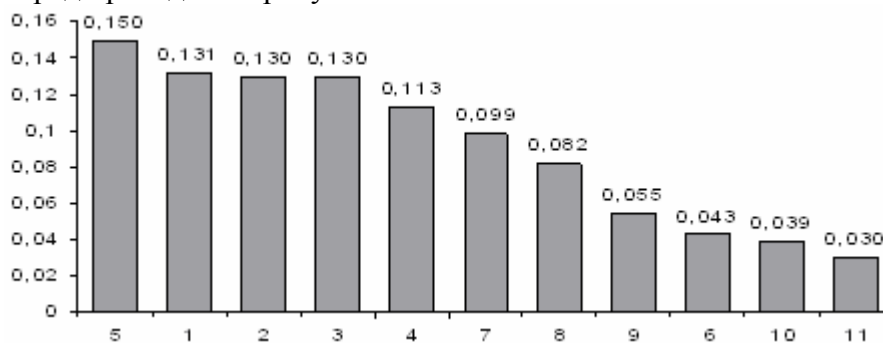


Рисунок 1 – Ранжированный ряд видов угроз в автономных (судовых) электросистемах 1-электроопасность; 2-дугоопасность; 3-пожароопасность; 4-искроопасность; 5- опасность перебоя в электроснабжении ответственных потребителей; 6-опасность перебоя электроснабжения бытовых, технологических и других неотчетственных потребителей; 7-опасность возникновения дуговых перенапряжений; 8-опасность перенапряжений, вызванных несимметрией фазных емкостей сети; 9-опасность возникновения радиопомех, порождаемых сетью в устройствах радиосвязи через кондуктивные соединения; 10- опасность возникновения радиопомех, порождаемых сетью в устройствах радиосвязи и передающихся через эфир; 11-опасность высших гармоник

Для проведенного опроса коэффициент конкордации оказался равным 0.743, что говорит о наличии достаточно согласованного мнения специалистов в оценке важности различных видов угроз в рассматриваемом классе автономных (судовых) электросистем.

Все сопоставляемые виды угроз можно разделить на четыре группы: 1) характеризующиеся показателями бесперебойности электроснабжения потребителей; 2) характеризующиеся величиной тока однофазного замыкания на землю; 3) характеризующиеся уровнем максимальных перенапряжений; 4) прочие виды угроз, которые в дальнейшем не будут учитываться в силу их незначительной важности для безопасности сети. Таким образом, для оценки эффективности режимов нейтрали будут использоваться три весовых коэффициента, два из которых являются обобщенными для отдельных групп показателей – ток для показателей 1, 2, 3 и 4, уровень перенапряжений для показателей 7 и 8. Для автономных (судовых) электросистем низких классов напряжений после отбрасывания показателей четвертой группы (№9, 6, 10 и 11) и соответствующего пересчета показателей 1, 2 и 3 групп новые весовые коэффициенты приобрели следующие значения: для показателя группы 1 – 0.180; группы 2 - 0.603; группы 3 – 0.217. Можно ожидать, что такое же соотношение весовых коэффициентов будет справедливо для иных низковольтных автономных и общепромышленных электросистем.

Известно, что с ростом рабочего напряжения увеличиваются уровни возможных перенапряжений, а, следовательно, повышается и весовой коэффициент опасности, связанный с перенапряжениями. Если считать, что напряжение сети 35 кВ является граничным значением, выше которого опасность перенапряжений будет важнее опасности тока однофазного замыкания, то, принимая весовые коэффициенты обобщенных показателей второй и третьей групп равными при $U_n = 35$ кВ, можно описать изменение этих весовых коэффициентов следующими формулами

$$\mu_T = -0.003 \cdot U_n + 0.603, \quad (6)$$

$$\mu_{II} = 0.008 \cdot U_n + 0.217, \quad (7)$$

где U_n - номинальное напряжение сети, кВ.

Показатель первой группы, очевидно, можно принять не зависящим от величины номинального напряжения сети U_n . Выражение (1) с учетом найденных весовых коэффициентов отдельных групп показателей опасности и их изменения с ростом напряжения U_n можно переписать в виде:

$$\mathcal{E}_k = 0.18 \cdot X_{1,k} + (0.604 - 0.003 \cdot U_n) \cdot X_{2,k} + (0.217 - 0.008 \cdot U_n) \cdot X_{3,k}. \quad (8)$$

Ранжирование режимов нейтрали по показателю защитной эффективности

Выбор осуществлялся среди следующих режимов нейтрали: 1) изолированная; 2) резистивная; 3) компенсированная с ненастраиваемым ДГР; 4) компенсированная с настраиваемым ДГР; 5) комбинированная (параллельное включение ДГР и резистора); 6) компенсация полного тока однофазного замыкания и 7) глухозаземленная нейтраль. Далее показано сравнение режимов нейтрали по бесперебойности электроснабжения потребителей, току однофазного замыкания и кратности дуговых перенапряжений. При этом таблицы 1-3 заполняются следующим образом: в клетке, находящейся на пересечении по горизонтали с k -ым режимом нейтрали и по вертикали с $(k+n)$ -ым, в числителе ставятся баллы k -го режима нейтрали, а в знаменателе $(k+n)$ -го. В таблице 1 сравнены режимы нейтрали по их возможности обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

Сравнение режимов нейтрали по бесперебойности электроснабжения потребителей

Таблица 1

Режим нейтрали №1 - изолированная нейтраль	№1	1 0	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	1 0
Режим нейтрали №2 - резистивная нейтраль	№2	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1	1 0
Режим нейтрали №3 - компенсированная нейтраль с ненастраиваемым ДГР	№3		0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	1 0
Режим нейтрали №4 - компенсированная нейтраль с настраиваемым ДГР	№4		0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	1 0
Режим нейтрали №5 - комбинированная нейтраль	№5			0,5 0,5	0,5 0,5	1 0	1 0
Режим нейтрали №6 - компенсация полного тока замыкания	№6					1 0	1 0
Режим нейтрали №7 - глухозаземленная нейтраль	№7						№7

В таблице 2 показано сравнение режимов нейтрали по наибольшим величинам установившегося тока однофазного замыкания.

Сравнение режимов нейтрали по величине тока однофазного замыкания

Таблица 2

Режим нейтрали №1 - изолированная нейтраль	№1	1 0	0 1	0 1	0 1	0 1	1 0
Режим нейтрали №2 - резистивная нейтраль	№2	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1	1 0
Режим нейтрали №3 - компенсированная нейтраль с ненастраиваемым ДГР	№3		0 1	1 0	0 1	0 1	1 0
Режим нейтрали №4 - компенсированная нейтраль с настраиваемым ДГР	№4			1 0	0 1	1 0	1 0
Режим нейтрали №5 - комбинированная нейтраль	№5				0 1	1 0	1 0
Режим нейтрали №6 - компенсация полного тока замыкания	№6					1 0	1 0
Режим нейтрали №7 - глухозаземленная нейтраль	№7						№7

В таблице 3 показано сравнение по наибольшим кратностям дуговых перенапряжений на основе сведений о них, приведенных в различных источниках для компенсированной [2], комбинированной [3], изолированной, резистивной нейтралей [4], для компенсации полного тока замыкания [5] при напряжениях сети 6-10 кВ и [6] для сетей с различными режимами нейтрали напряжением 0,23 кВ.

Сравнение режимов нейтрали по кратности дуговых перенапряжений

Таблица 3

Режим нейтрали №1 - изолированная нейтраль	№1	0 / 1	0,5 / 0,5	0 / 1	0 / 1	0 / 1	0 / 1
Режим нейтрали №2 - резистивная нейтраль	№2	1 / 0	1 / 0	0 / 0	0 / 1	1 / 0	0 / 1
Режим нейтрали №3 - компенсированная нейтраль с ненастраиваемым ДГР	№3		0,5 / 0,5	0 / 0	0 / 1	0 / 1	0 / 1
Режим нейтрали №4 - компенсированная нейтраль с настраиваемым ДГР	№4			0 / 0	0 / 1	0 / 1	0 / 1
Режим нейтрали №5 - комбинированная нейтраль	№5			1 / 0	0 / 0	0 / 1	0 / 1
Режим нейтрали №6 - компенсация полного тока замыкания	№6					0 / 0	0 / 1
Режим нейтрали №7 - глухозаземленная нейтраль	№7						0 / 1

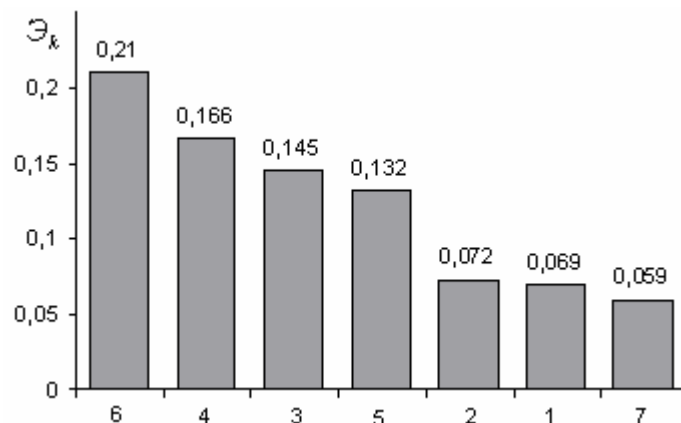
Вычисленные таким образом степени предотвращения опасностей в относительных единицах приведены в таблице 4.

Степени предотвращения опасностей

Таблица 4

Режим нейтрали	Степень предотвращения опасностей, связанных с бесперебойностью электроснабжения	Степень предотвращения опасностей, связанных с током однофазного замыкания	Степень предотвращения опасностей, связанных с дуговыми перенапряжениями
Изолированная	0.037	0.095	0.024
Резистированная	0.009	0.048	0.19
Компенсированная с ненастраиваемым ДГР	0.037	0.191	0.048
Компенсированная с настраиваемым ДГР	0.037	0.238	0.071
Комбинированная	0.037	0.143	0.238
С компенсацией полного тока замыкания	0.037	0.286	0.143
Глухозаземленная	0	0	0.268

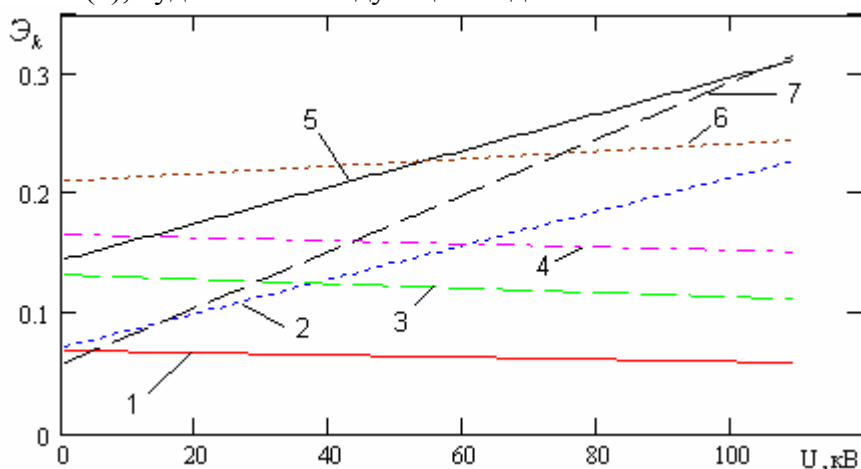
На рисунке 3 показано сравнение режимов нейтрали для низковольтных автономных электросетей по обобщенному показателю эффективности \mathcal{E}_k , определенному по выражению (8).



- 1- изолированная,
 2- резистированная,
 3- компенсированная с ненастраиваемым ДГР,
 4- компенсированная с настраиваемым ДГР,
 5- комбинированная,
 6- с компенсацией полного тока замыкания,
 7- глухозаземленная

Рисунок 3 – Сравнение режимов нейтрали для автономных (судовых) электросетей напряжением 0,4 кВ по обобщенному показателю эффективности

При этом соотношение между показателями эффективности рассматриваемых режимов нейтрали будет меняться в зависимости от рабочего напряжения сети. Такое изменение согласно выражению (8), будет иметь следующий вид



- 1- изолированная,
 2- резистированная,
 3- компенсированная с ненастраиваемым ДГР,
 4- компенсированная с настраиваемым ДГР,
 5- комбинированная,
 6- с компенсацией полного тока замыкания,
 7- глухозаземленная

Рисунок 4 – Изменение эффективности режимов нейтрали в зависимости от номинального напряжения сети

О правильности подхода можно судить по тому, как он подтверждается на практике. В таблице 5 показано ранжирование режимов нейтрали по данным об их эксплуатации в сети 6 кВ на основе количества аварийных отключений и по обобщенному показателю эффективности. Как видно, соотношение по эффективности между рассматриваемыми режимами нейтрали полученное при помощи многокритериального подхода практически совпадает с эксплуатационными данными.

Сравнение результатов выбора режима нейтрали с эксплуатационными данными

Таблица 5

Ранжирование режимов нейтрали по данным [1], полученным в действующих сетях СН 6 кВ.	Ранжирование режимов нейтрали по обобщенному показателю эффективности для сети 6 кВ
1 – Полная компенсация тока однофазного замыкания; 2 – Компенсированная нейтраль с ненастраиваемым ДГР; 4 – Резистивная нейтраль (R=134 Ом); 3 – Изолированная нейтраль;	1 – Полная компенсация тока однофазного замыкания; 2 – Компенсированная нейтраль с ненастраиваемым ДГР; 3 – Резистивная нейтраль; 4 – Изолированная нейтраль.

Выводы

1. Предложена методика, реализующая комплексный подход к выбору режима нейтрали, основанная на учете основных угроз со стороны электросистемы в режиме однофазного замыкания на землю. Применение этой методики позволяет определять наиболее предпочтительный способ заземления нейтрали сетей еще на начальной стадии их проектирования.
2. Защитная эффективность отдельных режимов нейтрали зависит от величины номинального напряжения сети U_n .
3. Сопоставление результатов, полученных по разработанной методике с эксплуатационными данными, зарегистрированными для ограниченного списка режимов нейтрали в сетях СН 6 кВ Рефтинской ГРЭС, показало их совпадение.

Литература

1. Обабков В.К. Сравнительный анализ и оптимизация режимов заземления нейтрали в коротких сетях различного назначения. / В.К. Обабков // Вестник госэнергонадзора и энергосбережения. – 2002. - №2 С.41-49
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. - М., 1971. – 152 с.
3. Кричко В.А. Опыт эксплуатации автоматических систем компенсации емкостного тока замыкания на землю / В.А. Кричко, И.А. Миронов // Труды научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» 26-28 сентября / Новосибирск, 2006
4. Короткевич М.А. Перенапряжения в сети 6-35 кВ с изолированной, компенсированной и заземленной через резистор нейтралью / М.А. Короткевич, А.М. Протас // Труды научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» 26-28 сентября / Новосибирск, 2006
5. Ефимов Ю.К. Система автоматического подавления дуговых замыканий в сетях собственных нужд энергоблоков 500 МВт / Ю.К.Ефимов, В.К.Обабков, Ю.Н.Целуевский, О.Г.Шишкина // Электрические станции. – 1992. - № 5 С.71-75
6. Благинин В.А. Экспериментальная оценка максимальных кратностей дуговых перенапряжений в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В.А. Благинин, В.И. Лозовенко, А.В. Вечерин, И.Е. Кажекин, С.В. Макаров // Электрооборудование судов и электроэнергетика: сборник научных трудов/ КГТУ. – Калининград, 2004. – С. 81 – 86.