

НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: ЭФФЕКТЫ НАГРУЗКИ, ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕОРИЯ

Асан уулу Аскат, инженер кафедры «Электроэнергетика», Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: asanaskat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4391-4139>;

Нурлан уулу Санжар, магистр, КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: scorpion.95.kg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5353-3009>

Жапаров Кутманбек Савенович, магистр, КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: kutman.94.kg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5589-3015>.

Аннотация. Падение напряжения на клеммах чувствительного оборудования часто происходит из-за неисправностей, возникающих при гораздо более высоком уровне напряжения. Даже если ток нагрузки является небольшим по сравнению с током повреждения, изменения тока нагрузки во время и после повреждения по-прежнему приводят к тому, что напряжение на клеммах оборудования отличается от напряжения на уровне напряжения повреждения. В этой статье обсуждается изменение формы и величины падения напряжения при его распространении от уровня напряжения, вызвавшего повреждение клемм оборудования. Как сбалансированные, так и несбалансированные провалы напряжения обсуждаются путем представления теоретических соображений и измерений. Количественная модель для нагрузки асинхронного двигателя; для других видов нагрузки дается качественный анализ. Исследования распространения падений напряжения из-за симметричных и несимметричных неисправностей могут быть упрощены с использованием симметричных компонентов и соответствующих характеристик «характеристического падения напряжения» и «коэффициента PN».

Ключевые слова: падения напряжения, провалы напряжения, симметричные ошибки, несимметричные ошибки, токи прямой последовательности, модель,

DISTRIBUTIVE SYSTEM VOLTAGES: LOAD EFFECTS, MEASUREMENTS AND THEORY

Asan uulu Askat, Engineer of the Department "Electric Power", KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Ch.Aitmatov av., e-mail: asanaskat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4391-4139>

Nurlan uulu Sanjar, Magister, KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Ch.Aitmatov av., e-mail: scorpion.95.kg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5353-3009>;

Zhaparov Kutmanbek Savenovich, Magister, KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Ch.Aitmatov av., e-mail: kutman.94.kg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0004-5158-2853>.

Annotation. The voltage drop across the terminals of sensitive equipment often occurs due to faults occurring at a much higher voltage level. Even if the load current is small compared to the fault current, changes in the load current during and after the fault still cause the voltage at the equipment terminals to be different from the voltage at the fault voltage level. This article discusses the change in the shape and magnitude of the voltage drop during its propagation from the voltage level that caused damage to the equipment terminals. Both balanced and unbalanced voltage dips are discussed by presenting theoretical considerations and measurements. Quantitative model for the load of an asynchronous motor; for other types of load a qualitative analysis is given. Studies of the propagation of voltage drops due to symmetrical and asymmetrical faults can be simplified using symmetrical components and the corresponding characteristics of “characteristic voltage drop” and “PN coefficient”.

Keywords: voltage drops, voltage dips, symmetric errors, asymmetrical errors, direct sequence currents, model,

Падения напряжения - это кратковременное снижение среднеквадратичного напряжения из-за неисправностей, запуска двигателя или включения трансформатора. Они могут привести к отключению чувствительных нагрузок, таких как компьютеры, оборудование для управления процессами и приводы с регулируемой скоростью. Наиболее серьезные провалы напряжения для оборудования конечного пользователя возникают из-за неисправностей [1] [2]. В этой статье будут обсуждаться только провалы напряжения из-за неисправностей.

Симметричные ошибки

Оставшееся напряжение провала (то есть напряжение во время короткого замыкания) в точке общей связи между нагрузкой и коротким замыканием можно рассчитать по модели делителя напряжения, показанной на рисунке 1. Для трехфазных неисправностей следующие выражение содержит:

$$V = \frac{Z_{F1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} E_1 \quad (1)$$

Выражение (1) часто используется и для напряжения на клеммах оборудования. Обоснование этого приближения варьируется, но основное предположение всегда заключается в том, что ток через неисправный фидер является основной причиной падения напряжения. Несмотря на свои ограничения (1) оказалось очень подходящим выражением.

Несимметричные ошибки

Для несимметричных разломов выражения похожи, но немного сложнее. Систематический анализ, основанный на симметричных компонентах, представлен в [3] и [4]. Результирующая характеристика несбалансированных провалов (то есть провалов из-за несимметричных неисправностей) приводит к «характеристическому напряжению», которое является обобщенной версией оставшегося напряжения для сбалансированных провалов, и второй характеристике, называемой PN-фактором. F или двухфазные замыкания на землю и межфазные замыкания, характеристическое напряжение находится из (1); для однофазных неисправностей также величины нулевой последовательности влияют на результат:

$$V = \frac{Z_{F1} + \frac{1}{2}(Z_{F0} + Z_{S0})}{Z_{F1} + Z_{S1} + \frac{1}{2}(Z_{F0} + Z_0)} E_1 \quad (2)$$

Определение второй характеристики, PN-фактора, выходит за рамки данной статьи, и читатель может обратиться к литературе [3] [4] для получения более подробной информации. Для трехфазных повреждений PN-фактор равен остаточному напряжению; для однофазных и межфазных повреждений PN-коэффициент равен напряжению источника E_1 :

$$F = E_1 \quad (3)$$

для двухфазных замыканий на землю PN-коэффициент получается из:

$$F = \frac{Z_{F1} + 2(Z_{F0} + Z_{S0})}{Z_{F1} + Z_{S1} + 2(Z_{F0} + Z_{S0})} E_1 \quad (4)$$

Модель, приводящая к выражениям (1) - (4), является статической моделью. Основные предположения, лежащие в основе этой модели, заключаются в том, что импедансы прямой и обратной последовательностей равны и что все сопротивления постоянны (то есть не зависят от времени). Эта модель приводит к «прямоугольному провалу» с резким падением среднеквадратичного напряжения, постоянным среднеквадратичным напряжением во время повреждения и резким восстановлением. В предположении о постоянном импедансе все импедансы нагрузки могут быть включены в напряжение источника и эквивалент импеданса, а напряжения на клеммах двигателя равны напряжениям на ПКК. Другими словами: в статической модели провал напряжения распространяется от ПКК к клеммам оборудования без каких-либо изменений остаточного напряжения (характеристическое напряжение и коэффициент ПШ для несбалансированных провалов).

Распространение провалов.

Симметричные ошибки

Чтобы рассчитать напряжение на клеммах оборудования (или в месте расположения монитора при более низком уровне напряжения, чем неисправность), необходимо учитывать изменение импеданса нагрузки из-за провала. Необходима полустатическая или динамическая модель, которая учитывает изменение сопротивления нагрузки во время и после повреждения. Разные типы нагрузки имеют различное поведение, но основные динамические эффекты, вероятно, связаны с асинхронными двигателями. Нагрузочная модель, основанная на нагрузке асинхронного двигателя, показана на рисунке 2 для компонента прямой последовательности, таким образом, для провалов из-за симметричных неисправностей.

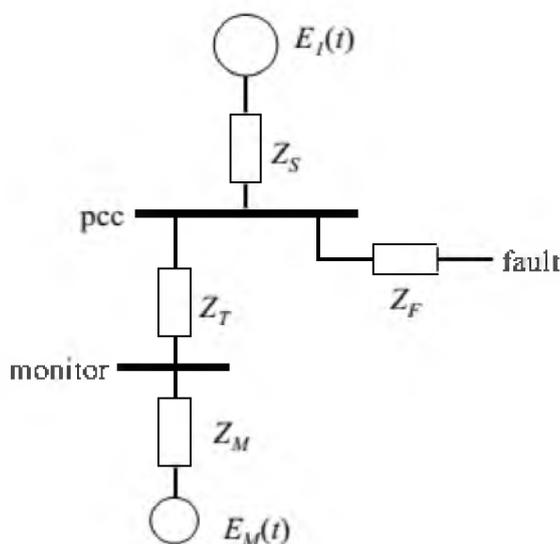


Рисунок 2, модель прямой последовательности для расчета характеристик падения напряжения при включении эффектов динамической нагрузки

Распространение компонентов прямой последовательности от рсс (индекс p) к месту мониторинга (индекс m) можно описать следующим образом:

$$U_{1m} = \frac{Z_M}{Z_T + Z_M} U_{1p} + \frac{Z_T}{Z_T + Z_M} E_M \quad (5)$$

Нагрузка асинхронного двигателя моделируется как источник напряжения (противо-ЭДС) E_M за импедансом Z_M . При нормальной работе обратная ЭДС немного ниже, чем напряжение на клеммах двигателя. Когда напряжение на клеммах падает до более низкого значения при возникновении неисправности, возникает обратная ЭДС, но с некоторой задержкой, определяемой постоянной времени перехода асинхронного двигателя. Когда скорость двигателя падает во время провала, это приводит к дальнейшему затуханию обратной ЭДС. Когда напряжение восстанавливается после устранения неисправности, возникает обратная ЭДС, опять же с задержкой, определяемой постоянной времени перехода и восстановлением скорости двигателя.

Результирующее поведение напряжения при напряжениях на клеммах выглядит следующим образом: первоначально напряжение на клеммах выше, чем напряжение на ПКС; эта разница уменьшается за период времени, определяемый нестационарной постоянной времени двигателей. При более длительных провалах и больших нагрузках на двигатель напряжение на клеммах будет падать и станет меньше напряжения на ПКС.

Несимметричные ошибки

Для несимметричных неисправностей необходимо учитывать как напряжение прямой последовательности, так и напряжение обратной последовательности. Распространение напряжения нулевой последовательности определяется главным образом соединениями обмотки трансформатора и не обсуждается в этой статье. Падение напряжения на клеммах оборудования редко содержит компонент нулевой последовательности.

Модель распространения напряжения обратной последовательности показана на рисунке 3, что эквивалентно модели прямой последовательности на рисунке 2. Модель для компонента обратной последовательности имеет те же значения импеданса, но напряжения источника равны нулю.

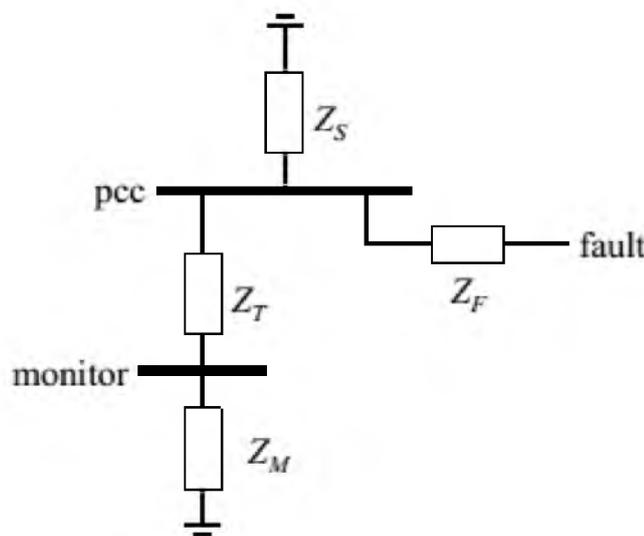


Рисунок 3, модель обратной последовательности для расчета характеристик падения напряжения при включении эффектов динамической нагрузки.

Распространение положительных (нижний индекс 1) и отрицательных последовательностей (нижний индекс 2) компонентов от ПКС (нижний индекс p) к месту мониторинга (нижний индекс m) можно описать следующим образом:

$$U_{1m} = \frac{Z_M}{Z_T + Z_M} U_{1p} + \frac{Z_T}{Z_T + Z_M} E_M \quad (6)$$

$$U_{2m} = U_{2p} \frac{Z_M}{Z_M + Z_T} \quad (7)$$

Для расчета напряжения последовательности на ПКС две сети последовательности должны быть соединены в месте повреждения таким образом, который зависит от типа повреждения. Но для упрощенного анализа, представленного в этой статье, влияние нагрузки на напряжения на ПКС игнорируется. Напряжение положительной и обратной последовательности рассчитывается по модели делителя напряжения на рисунке 1, тогда как нагрузка влияет только на распространение до более низких уровней напряжения.

Распространение напряжения прямой последовательности такое же, как и при трехфазной неисправности, изначально оно выше, чем на ПКС и становится ниже для длинных провалов. Напряжение обратной последовательности на клеммах оборудования во всех случаях ниже, чем на ПКС, так как нет источника напряжения обратной последовательности, кроме неисправности.

Как упомянуто ранее, несбалансированные провалы могут быть описаны через характеристическое напряжение V и коэффициент PN , где значения при рсс находятся из (1) - (4) выше, с коэффициентом PN , равным (положительному последовательность) напряжение источника для однофазных и межфазных неисправностей, большинство несимметричных неисправностей. Как показано в [3], распространение характеристического напряжения и коэффициента PN от ПКС до клемм оборудования описывается следующими выражениями:

$$V_m(t) = \frac{Z_M}{Z_M + Z_T} V_p(t) + \frac{Z_T}{Z_M + Z_T} E_M(t) \quad (8)$$

$$F_m(t) = \frac{Z_M}{Z_M + Z_T} F_p(t) + \frac{Z_T}{Z_M + Z_T} E_M(t) \quad (9)$$

Несимметричные неисправности: Для несимметричных неисправностей распространение характеристического напряжения и коэффициента PN можно рассчитать в соответствии с (8) и (9). Рассмотрим тот же случай, что и для симметричной неисправности, с характерным напряжением 20% и коэффициентом PN 100% на первичной стороне трансформатора 130/10 кВ. Начальное поведение характеристического напряжения такое же, как и для симметричной ошибки, и начальный коэффициент PN составляет 100% для всех уровней напряжения. Падение напряжения прямой последовательности на клеммах двигателя, однако, составляет только половину падения при симметричной неисправности. В результате обратная ЭДС не затухает так сильно, как при симметричной ошибке. Предполагая, что падение противо-ЭДС также составляет половину падения при симметричном замыкании (таким образом, до 66% при 10 кВ и до 72% при 400 В), характеристическое напряжение после нескольких циклов составляет 26% при 10 кВ и 33% при 400 В; PN -фактор составляет 95% при 10 кВ и 91% при 400 В.

ИЗМЕРЕНИЕ

Чтобы проверить эту модель распространения падения напряжения, измерения были выполнены при трех уровнях напряжения (132 кВ, 10 кВ и 400 В) в радиальной распределительной сети [5], некоторые результаты измерений представлены здесь. Во всех

случаях симметричные составляющие напряжения получаются из комплексных фазных напряжений. Сложные фазовые напряжения получают путем применения дискретного преобразования Фурье к прямоугольному скользящему окну полупериода, предполагая симметрию между положительным и отрицательным полупериодами формы волны напряжения.

Симметричные ошибки

Результаты для провала из-за трехфазного замыкания показаны на рисунке 4. На этом рисунке показан очень глубокий провал из-за трехфазного замыкания на соседних линиях 132 кВ. Сразу после возникновения неисправности остаточное напряжение явно увеличивается с 132 кВ до 400 В. Приблизительно после двух циклов разница становится меньше, но остается небольшая разница.

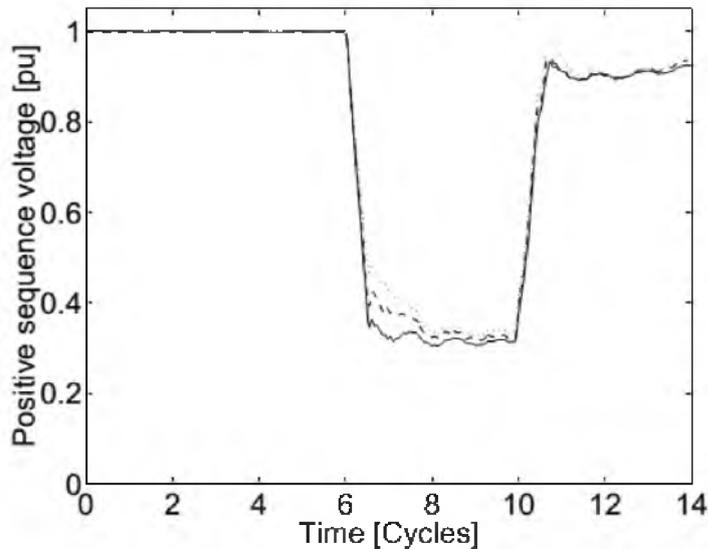
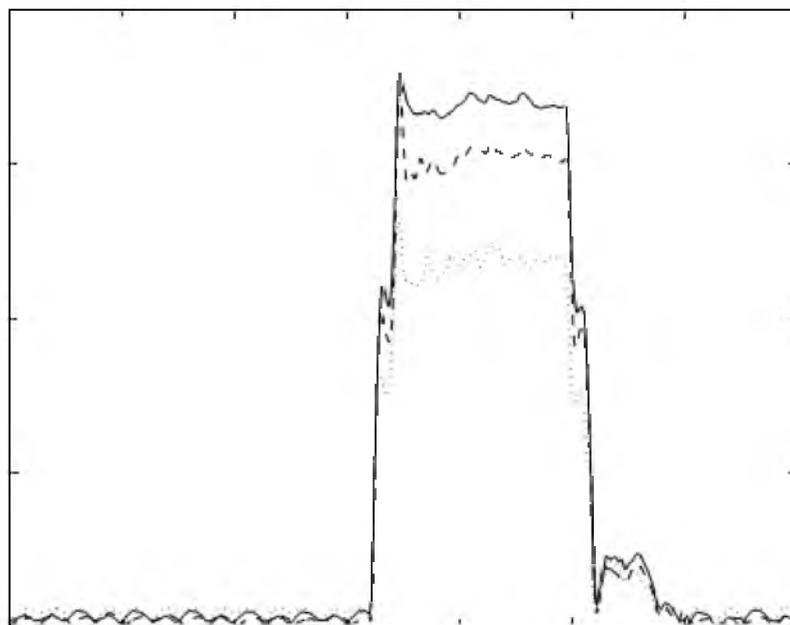


Рисунок 4, Напряжение прямой последовательности при 132 кВ (сплошная), 10 кВ (пунктирная) и 400 Вольт (пунктирная).



На рисунке 6 показано полупериодное напряжение обратной последовательности при 132 кВ (сплошная), 10 кВ (пунктирная) и 400 В (пунктирная).

Несимметричные разломы

Напряжения прямой и обратной последовательности для провала из-за несимметричного повреждения показаны на рисунках 5 и 6 соответственно. Поведение напряжения прямой последовательности аналогично поведению, показанному на рисунке 4. Спад напряжения происходит медленнее из-за меньшего падения напряжения прямой последовательности на клеммах двигателя. Поведение напряжения обратной последовательности отличается от поведения напряжения обратной последовательности: напряжение обратной последовательности остается постоянным во время неисправности и уменьшается в направлении нагрузки.

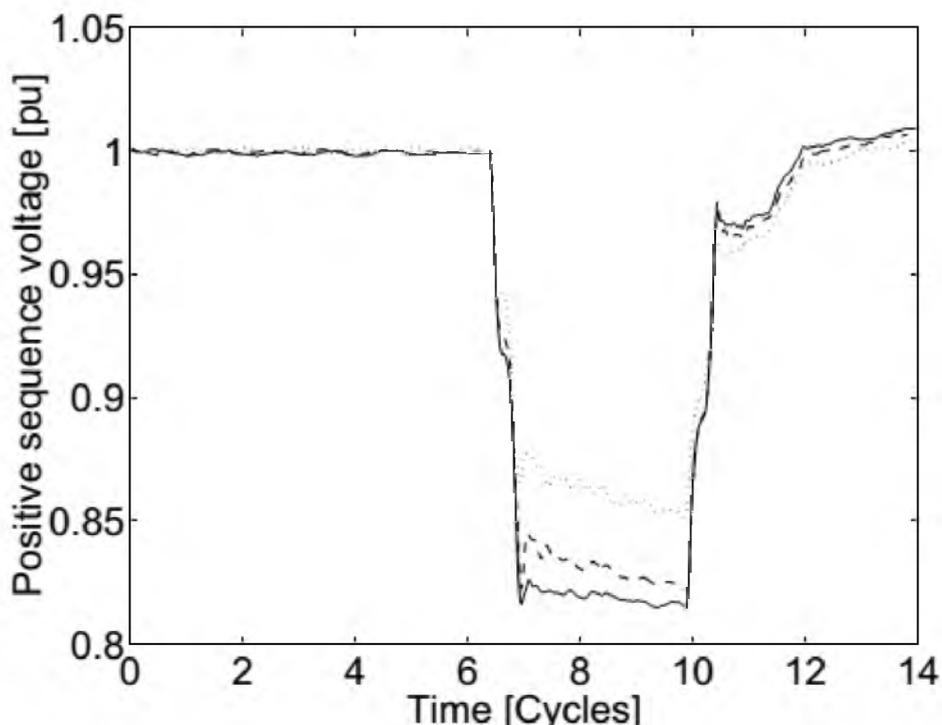


Рисунок 5, напряжение прямой последовательности при 132 кВ (сплошная), 10 кВ (пунктирная) и 400 В (пунктирная).

ВЫВОДЫ

Выводы из теоретического анализа асинхронно-двигательной нагрузки:

- при кратковременных провалах напряжение прямой последовательности возрастает от неисправного уровня к нагрузке. Это увеличение связано с вкладом двигателя в отказ, и оно становится меньше после нескольких циклов.
- для длительных провалов и больших нагрузок двигателя. нагрузка двигателя будет воспринимать больший ток, когда его скорость падает, что приводит к падению напряжения, которое будет больше к нагрузке.
- напряжение обратной последовательности становится меньше при переходе от повреждения к нагрузке. Постоянно во время ошибки.

Из качественного анализа мы пришли к выводу, что поведение другой нагрузки аналогично поведению асинхронного двигателя. Поэтому модель нагрузки асинхронного двигателя может быть использована для качественного анализа распространения провалов напряжения от поврежденного уровня напряжения до клемм оборудования. Эти выводы подтверждаются измерениями. Необходима дальнейшая работа над значениями для полного сопротивления и различных постоянных времени для типичных нагрузок, для количественного анализа электронной нагрузки и дальнейших измерений до подтвердили наши выводы.

Список литературы:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. [Текст] / Учебник для электроэнергетических спец. вузов. / В.А. Веников - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа. 1970. - 472 с., с ил.
2. Веников В.А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей. Веников В.А., Жуков Л.А., Поспелов Г.Е.//Под ред. Веникова В.А. - Высшая школа, 1975, - 344 с.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. Под ред. А.Жукова. - М.: Энергия, 1979. - 456 с. ил.
4. Веников В.А., Мариносян Р.Э Статическая устойчивость как частный случай динамической устойчивости электрических систем Электричество. 1981. №6. С.6-9.
5. Козлов А.Н., Джунуев Т.Т. Макромодели синхронной машины и группы машин в системах ограниченной мощности. Вестник амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. №67. – Благовещенск, 2014. - С.100-104.
6. Строев В.А., В.А. Строев, С.И. Николаев Об учете автоматических регуляторов в расчетах переходных процессов электроэнергетических систем. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. -№3.
7. М.Х.Дж. Боллен, 2000, Понимание проблем качества электроэнергии - провалы напряжения и перебои, IEEE Press, Нью-Йорк.
8. Р.С. Дуган М.Ф. McGranaghan, Н.В. Битти, 1996, Качество электроэнергетических систем, McGraw Hill, Нью-Йорк.
9. М.Х.Дж. Боллен, доктор философии Чжан, 2003, «Различные методы классификации трехфазных несимметричных провалов напряжения из-за неисправностей», Исследование электроэнергетических систем, в печати.
10. Л.Д. Чжан М.Х.Дж. Боллен, 2000, Характеристика провалов напряжения (провалов) в энергосистемах, IEEE Транзакции на поставку электроэнергии, том 15, № 2, с. 827-832.
11. М.Х.Дж. Боллен, 2001, «О распространении падения напряжения», Труды IEEE PES Летняя встреча.