

Точки минимального напряжения как характерные особенности слабых участков электрической сети

Наровлянский В.Г., д-р техн. наук, Курмак В.В., асп.

Рассмотрены особенности использования точек минимального напряжения на «слабых» участках электрической сети как признаков ухудшения устойчивости электроэнергетической системы.

Ключевые слова: нарушения устойчивости, область параметров, диаграмма изменения напряжения, реактивная мощность, электрический центр качания.

Points of Minimum Voltage as Special Features of Weak Circuit Sections

V.G. Narovlyanskiy, Doctor of Engineering, V.V. Kurmak, Post Graduate Student

The authors consider the special features of using the points of minimum voltage at the weak circuit sections as the signs of deterioration of power engineering system stability.

Key words: stability breach, parameter region, diagram of voltage change, reactive power, electric center of oscillation.

Нарушение устойчивости электроэнергетической системы представляет постоянную и серьезную угрозу. Это событие может привести к возникновению аварии с повреждением оборудования электроэнергетической системы и прекращению энергоснабжения потребителей. Поэтому представляется полезным заблаговременно выявлять признаки изменения условий работы электроэнергетической системы в направлении ухудшения устойчивости.

Возникающие при нарушении устойчивости аварийные, в том числе асинхронные, режимы представляют серьезную опасность для энергосистемы, так как могут привести к развитию аварии и обесточиванию ответственных потребителей. Поэтому в настоящее время широко применяются автоматика предотвращения нарушения устойчивости, делительная автоматика и другие средства противоаварийной автоматики.

Для того чтобы отслеживать и своевременно предотвращать возникновение нарушения устойчивости в энергосистеме, необходимо иметь информацию о параметрах режима. Новые технологии позволяют получать информацию о текущих значениях векторов параметров режима средствами современной телеметрии. Для рациональной расстановки этих устройств необходимо знание о слабых связях, формирующих опасные и контролируемые сечения.

Нарушение устойчивости параллельной работы электроэнергетической системы приводит к возникновению асинхронных режимов в энергосистеме. Асинхронный режим является исключительно тяжелым, в течение каждого проворота векторов ЭДС, генератор переходит из генераторного режима в двигательный, что создает большие моменты на валу агрегата, в то же время напряжение в узлах потребителей может снижаться ниже допустимого значения. Ввиду особой опасности такого режима необходимо применять меры к его быстрому прекращению. Автоматика ликвидации асинхронного режима разделит несинхронно работающие части энергосистемы по связям, на которых зафиксирован электрический центр качания (ЭЦК).

Для оценки состояния текущего режима и проведения быстрых и эффективных мер по ликвидации аварийных режимов, а также при решении задач проектирования и модернизации противоаварийной автоматики необходимо знать о слабых участках сети (слабых связях), входящих в состав опасных сечений.

В работах [1], [2] рассмотрено представление о точке минимального напряжения (ТМН) на участке линии электропередачи. Показано, что напряжение вдоль участка носит параболический характер и при достижении определенного угла на некоторых линиях появляется характерный «провал» – точка минимального напряжения. Существование такой точки является признаком наличия на этом участке электрического центра качаний. Выполнен анализ условий существования ТМН на линии электропередачи. Показано, что участок электропередачи, содержащий ТМН, является «слабым» и может войти в состав опасного сечения при развитии соответствующего асинхронного режима.

В работе [2] показано, что для участка линии от узла с напряжением $\dot{U}_0 = U_0 e^{j\alpha_0}$ до узла с напряжением $\dot{U} = U e^{j\alpha}$ (рис. 1) распределение напряжения участка имеет вид

$$\dot{U}(x) = (1-x)\dot{U}_0 + x\dot{U}. \tag{1}$$

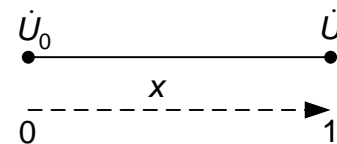


Рис. 1. Участок однородной линии

При этом величина квадрата модуля напряжения имеет минимум в точке

$$x_{\min} = \frac{1 - v\psi}{1 - 2v\psi + v^2}, \tag{2}$$

а величина напряжения в ТМН

$$v_x^2 = v^2 \frac{1 - \psi^2}{1 - 2v\psi + v^2}, \tag{3}$$

где

$$v = U/U_0, \delta = \alpha - \alpha_0, \tag{4}$$

$$\psi = \cos \delta \in [-1; 1]. \tag{5}$$

Условие попадания ТМН в пределы участка имеет вид

$$x_{\min} \in [0; 1]. \tag{6}$$

Рассмотрим ТМН с нулевым значением напряжения.

Уравнение $v_x^2 = 0$ не имеет корней в случае $v = 1, \delta = 0$.

Для $v \neq 1, \delta = 0$ положение ТМН, в соответствии с (2), получаем в виде $x_{\min} = 1/(1-v)$. При этом условие (6) выполняется только для $v = 0$, такое решение не соответствует смыслу рассматриваемого процесса.

Наконец, для $\delta = 180^\circ$ при произвольной величине v положение ТМН в соответствии с (2) получаем в виде $x_{\min} = 1/(1+v)$, что полностью удовлетворяет условию (6).

Таким образом, при провороте векторов $\underline{U}, \underline{U}_0$ при асинхронном ходе в момент, когда угол между напряжениями участка достигает 180° , ТМН совмещается с точкой электрического центра качаний.

При меньшем угле разворота векторов напряжений наличие ТМН может рассматриваться в качестве указателя на линию с ЭЦК.

Отметим, что выражение (2) применимо для участков линий длиной не более 300 – 400 км [3]. Применение рассматриваемого подхода для длинных линий с распределенными параметрами требует отдельного рассмотрения.

Несмотря на видимую простоту выражения (2), из него затруднительно получить в аналитическом виде область параметров, удовлетворяющих условию (6). Поэтому получим представление о такой области численным способом. Диаграмма соотношения параметров, при которых ТМН попадает в пределы участка линии, представлена на рис. 2.

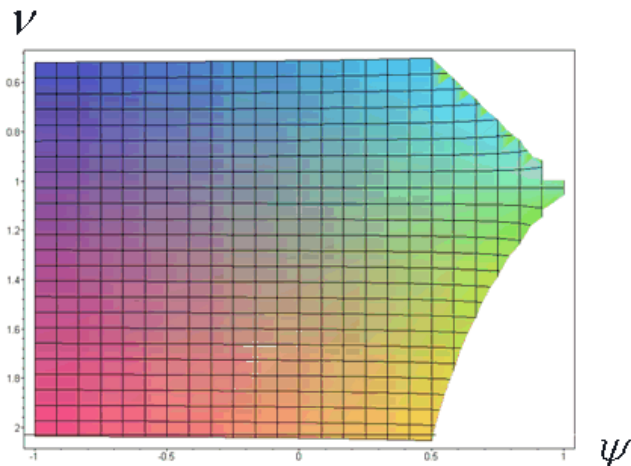


Рис. 2. Область параметров, при которых ТМН попадает в пределы участка линии

На рис. 3 приведен пример диаграммы изменения напряжения вдоль линии передачи, состоящей

из трех последовательных участков. Из диаграммы видно, что по мере увеличения относительного разворота векторов на концах линии напряжение на одном из участков «проседает» все глубже и стремится к нулевому значению в точке ЭЦК.

При рассмотрении такой диаграммы возникает вопрос – могут ли точки минимального напряжения находиться на паре смежных участках неоднородной линии электропередачи. Численные эксперименты, выполненные в широком диапазоне параметров сопротивлений участков, приводят к положительному ответу на этот вопрос. С другой стороны, наличие ТМН, как показано выше, однозначно связано с наличием на участке электрического центра качаний энергосистемы. При этом достаточно очевидно, что на линии электропередачи не должно быть двух точек ЭЦК.

Ниже подробно рассматривается эта проблема. Выполнен анализ условий существования ТМН на смежных участках такой линии. Результат рассмотрения этого вопроса важен для последующего решения задачи автоматизации определения опасных сечений в электроэнергетической системе.

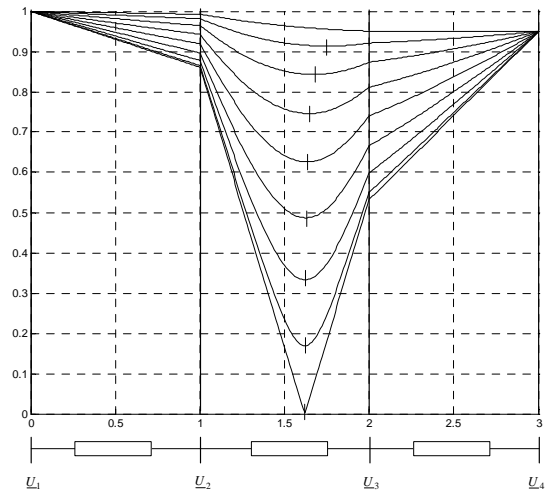


Рис. 3. Диаграмма распределения напряжения вдоль линии передачи

Определим условия существования ТМН на линии, состоящей из двух смежных участков неоднородной линии (рис. 4).

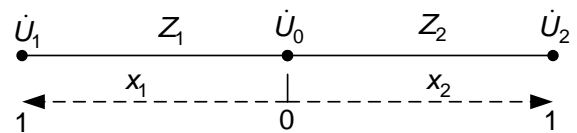


Рис. 4. Смежные участки неоднородной линии

Напряжение в центральном узле пары смежных участков имеет вид

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{U}_1 + \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{U}_2. \tag{7}$$

Перейдем к относительным единицам:

$$\dot{v} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1, \delta_{21} = \alpha_2 - \alpha_1, \tag{8}$$

$$\dot{v}_{01} = \dot{U}_1 / \dot{U}_0 = \frac{1 + \dot{\gamma}}{1 + \dot{\gamma} \dot{v}} = v_{01} e^{j\delta_{01}}, \delta_{10} = \alpha_1 - \alpha_0, \tag{9}$$

$$\dot{v}_{02} = \dot{U}_2 / \dot{U}_0 = \dot{v}_{01} \cdot \dot{v} = v_{02} e^{j\delta_{02}}, \delta_{20} = \alpha_2 - \alpha_0, \tag{10}$$

где

$$\dot{\gamma} \equiv \gamma e^{j\theta} = |Z_1 / Z_2| e^{j(\beta_1 - \beta_2)}. \tag{11}$$

Тогда, в соответствии с выражением (2), получим:

- для левого участка

$$x_{\min,1} = \frac{1 - v_{01} \cos(\delta_{01})}{1 - 2v_{01} \cos(\delta_{01}) + v_{01}^2}; \tag{12}$$

- для правого участка

$$x_{\min,2} = \frac{1 - v_{02} \cos(\delta_{02})}{1 - 2v_{02} \cos(\delta_{02}) + v_{02}^2}. \tag{13}$$

Рассмотрим вопрос, в какой области переменных $v, \delta, \gamma, \theta$, от которых зависит положение $x_{\min,1,2}$, возможно наличие минимумов на обоих смежных участках неоднородной линии.

Для решения поставленной задачи необходимо определить, в каком диапазоне изменяются интересующие нас переменные.

В узлах электрической сети 110 кВ и выше допустимые отклонения напряжения от номинальных значений определяются нормами для установленного оборудования электрических станций и сетей с учетом допустимых эксплуатационных повышений напряжения промышленной частоты на электрооборудовании (в соответствии с данными заводов-изготовителей и циркуляров), требованиями по устойчивости параллельной работы генераторов, частей синхронной зоны, устойчивости работы двигателей.

Минимально допустимые и аварийно допустимые напряжения в узлах с мощными электродвигателями или высокой долей электродвигательной нагрузки определяются через нормируемые коэффициенты запаса и критические по устойчивости напряжения.

Критическое напряжение в узлах такой нагрузки 110 кВ и выше при отсутствии более точных данных следует принимать равным $0,7 U_{\text{ном}}$ [4].

Наибольшие рабочие напряжения ($U_{н.р.}$) для объектов разных номинальных напряжений при отсутствии более точных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Наибольшие рабочие напряжения

$U_{\text{ном}}$, кВ	110	220	330	500	750	1150
$U_{н.р.}$, кВ	126	252	363	525	787	1200
$U_{н.р.}$, %	1,15	1,15	1,10	1,05	1,05	1,04

В соответствии с (11), параметрами схемы γ, θ , от которых зависит положение ТМН, являются сопротивления этих линий (Z_1, Z_2) и разности углов сопротивлений участков θ .

Используя [5], можно выполнить оценку величин сопротивления и угла линий разных классов напряжения. В табл. 2 даны расчетные сопротивления линии разного класса и длины, приведенные к одному классу напряжения 110 кВ.

В качестве неоднородной линии электропередачи мы будем рассматривать линию, участки которой имеют одну и ту же пропускную способность. В этом случае параметры этих участков должны быть близки, т.е. она должна состоять из участков одного или смежного класса напряжения.

Из этого следует, что, в соответствии с типовыми удельными параметрами линий разных классов напряжений, величина разности углов θ смежных участков линий от 220 кВ и выше не превышает 10° , а для смежных участков с линиями 110 кВ не превышает 30° .

Для того чтобы определить, в какой области параметров возможно существование ТМН на смежных участках неоднородной линии электропередачи, выполним ряд численных экспериментов, используя уравнения положения ТМН (12), (13).

Таблица 2. Приведенные параметры линий электропередач

Сечение	Число проводов в фазе	Z Ом/км	Z1 10 кВ, Ом/км	β°	Z, при L = 10 км	Z, при L = 80 км	Z, при L = 100 км	Z, при L = 400 км
110 кВ, максимальная длина 80 км.								
s = 70	1	0,613	0,613	46,5	6,13	49,00	-	-
s = 240		0,422	0,422	73,8	4,22	33,75	-	-
220 кВ.								
s = 240	1	0,451	0,113	74,8	1,13	9,01	11,27	45,07
s = 500		0,417	0,104	81,9	1,04	8,34	10,42	41,72
330 кВ								
s = 240	2	0,336	0,037	79,9	0,37	2,99	3,74	14,94
s = 500		0,321	0,036	84,7	0,36	2,86	3,57	14,28
500 кВ								
s = 300	3	0,312	0,015	83,9	0,15	1,21	1,51	6,04
s = 500		0,305	0,015	86,3	0,15	1,18	1,47	5,90
750 кВ								
s = 240	5	0,309	0,007	85,5	0,07	0,53	0,66	2,66
s = 500	4	0,303	0,007	87,2	0,06	0,52	0,65	2,61

Будем рассматривать отношения модулей напряжений по концам участка в интервале $\nu \in [0,6;1,6]$, а величину разворота угла в интервале $\delta \in [-180;180]$. Отношение модулей сопротивлений будем варьировать в широком интервале $\gamma \in [0,025;50]$, а величину разности углов в интервале $\theta \in [0;30]$.

Результаты численного эксперимента выявили возможность появления ТМН на смежных участках в рассмотренной области параметров.

Ниже на рис. 5–7 представлены диаграммы областей существования ТМН на смежных участках.

Область показана в координатах отношения сопротивлений смежных участков γ и разности их углов θ при разных углах разворота векторов напряжения по концам линии δ и для разных вариантов отношения напряжения ν на границах линии.

Отметим, что при переходе угла δ через отметку 180° область существования ТМН на смежных участках зеркально перемещается в область положительных θ .

Анализ рис. 5 показывает, что изменение величины отношения модулей напряжений ν сдвигает эту область вдоль оси абсцисс, при этом с увеличением угла разворота напряжений δ область существования ТМН на смежных участках стягивается вдоль оси к $\gamma = 1$.

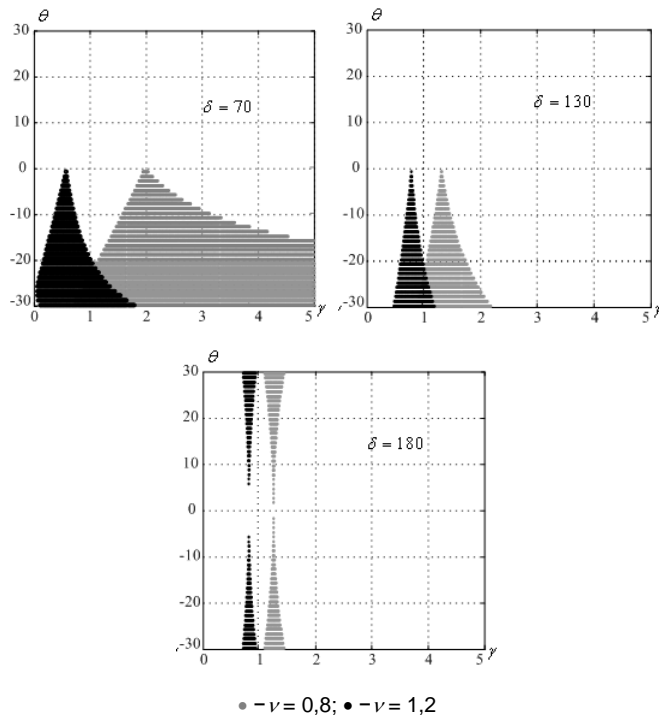


Рис. 5. Область существования ТМН на смежных участках

При $\gamma \approx 1$ сопротивления участков приблизительно равны друг другу, а ТМН находятся на границе участков.

Зависимость расстояний между ТМН от величины γ показана на рис. 6.

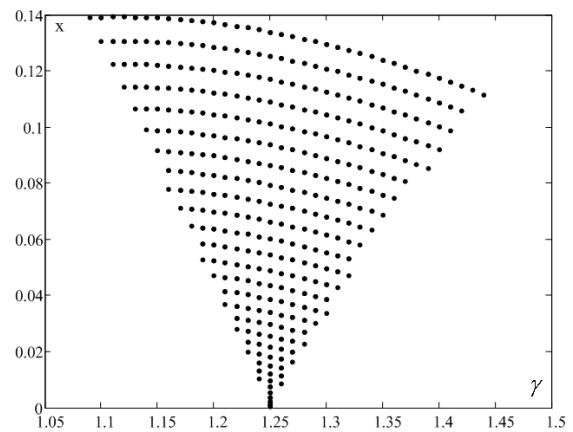


Рис. 6. Область расстояний между ТМН смежных участков

Если из полученных результатов отфильтровать случаи, имеющие провал напряжения менее 1 %, поскольку такая величина провала сравнима с погрешностью исходных данных о реальных параметрах участков, то получим диаграммы, показанные на рис. 7.

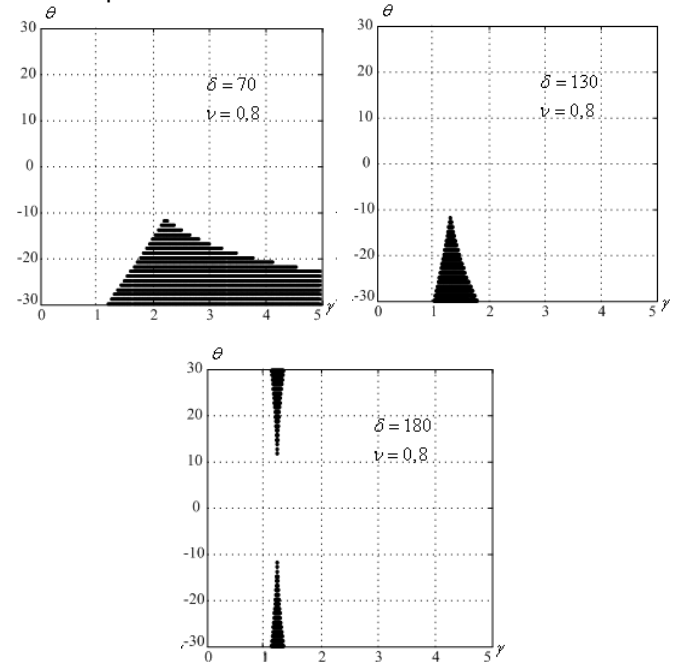


Рис. 7. Область существования ТМН на смежных участках с «провалом» напряжения более 1 %

Анализ полученных диаграмм показывает, что одновременное наличие ТМН на смежных участках существует, только начиная с разности углов сопротивлений участков θ более 10° . Это означает, что существование ТМН на смежных участках линий 220 кВ и выше невозможно. Поскольку рассматриваемый подход применяется для системообразующих сетей, то с учетом рекомендации применять для ВЛ 110 кВ сечения проводов не менее 240 и 400 мм² [5] можно говорить о том, что это справедливо и для линий напряжением 110 кВ.

Рассмотрим вопрос, как ведет себя величина реактивной мощности линии, определяемая в конечных узлах. На рис. 8 приведен пример диаграмм

мы изменения величин реактивной мощности на ближнем (рис. 8, кривая а) и дальнем (рис. 8, кривая б) концах участка.



Рис. 8. Зависимость реактивной мощности от угла разворота δ

В области I диаграммы реактивная мощность «проходит транзитом» от начала к концу участка:

$$Q_a \equiv \dot{U}_a \cdot \dot{I}^* > 0, Q_b \equiv \dot{U}_b \cdot \dot{I}^* > 0, \quad (14)$$

а в области II стекает «внутрь» участка:

$$Q_a \equiv \dot{U}_a \cdot \dot{I}^* > 0, Q_b \equiv \dot{U}_b \cdot \dot{I}^* < 0. \quad (15)$$

Как известно, ситуация, соответствующая условию (15), характерна для наличия ЭЦК на участке линии электропередачи.

Поскольку нас интересует выявление ТМН в качестве «индикатора» наличия на участке ЭЦК, то условие (14) целесообразно использовать в качестве фильтра. Будем полагать незначимыми ТМН, удовлетворяющие условию (14), а ТМН, удовлетворяющие условию (15), – значимыми.

При этом результаты расчетов показывают, что в области реальных параметров участков не наблюдается ситуации, при которой значимые ТМН располагаются на смежных участках линии.

Таким образом, наличие на линии электропередачи значимой ТМН является предвестником проблем, которые могут возникнуть при увеличении потока мощности по этой линии. Проседание напряжения увеличивается по мере увеличения потока мощности по такой линии. При достижении некоторого критического значения возникает опасность аварии, связанной с потерей устойчивости.

Поскольку выявление значимых ТМН возможно задолго до потери устойчивости электроэнергетической системы, то рассмотренный подход предоставляет эффективный механизм для контроля состояния энергосистемы.

Выявление значимых ТМН легко автоматизировать. Реализовать такую процедуру возможно как на базе расчетной модели энергосистемы при проек-

тировании, так и на основе телеметрической информации.

Современные технологии получения информации об условиях работы электроэнергетической системы и, особенно, система синхронизированных векторных измерений (WAMS) обеспечивают хорошую основу для такой автоматизации в режиме реального времени.

Результаты апробации изложенного метода, проведенной в ходе работы по реконструкции противоаварийной автоматики энергосистемы одного из регионов России, находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными на основе традиционных способов анализа энергосистемы.

Заключение

Введенное нами понятие «значимая точка минимального напряжения» характеризует определенное, особое поведение величины напряжения и мощности на участке линии передачи электроэнергетической системы.

Показано, что на линии электропередачи, состоящей как из однородных, так и из неоднородных участков, может существовать только такая точка.

Наличие такой точки свидетельствует о том, что на этом участке расположена точка ЭЦК. При этом выявление наличия ЭЦК становится возможным задолго до нарушения устойчивости режима работы электроэнергетической системы.

Выявление значимых ТМН легко автоматизировать и реализовать как на базе расчетной модели энергосистемы при проектировании, так и на основе телеметрической информации.

Использование изложенного подхода позволяет повысить эффективность и полноту выявления «слабых» участков энергосистемы и тем самым обеспечить повышение надежности управления режимом энергосистемы и работы противоаварийной автоматики.

Список литературы

1. Наровлянский В.Г. Современные методы и технические средства контроля и предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 359 с.
2. Курмак В.В., Наровлянский В.Г. Метод экспресс-анализа для выявления опасных сечений электроэнергетической системы // Электрические станции (в печати).
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 349 с.
4. СТО 17330282. 29.240. 001-2005. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 352 с.

Курмак Валерия Владимировна,

ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей» (ОАО «Институт «Энергосетьпроект»),
аспирант,

адрес: 105318, Россия, г. Москва, Ткацкая ул., д. 1,

телефон (495) 652-92-42,

e-mail: kurmak_v@oaosp.ru

Наровлянский Владимир Григорьевич,

ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей» (ОАО «Институт «Энергосетьпроект»),

доктор технических наук,

адрес: 105318, Россия, г. Москва, Ткацкая ул., д. 1,

телефон (495) 652-91-29,

e-mail: narovliansky_v@oaosp.ru