

Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ПОИСК БЛИЖАЙШЕГО ПРЕДЕЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА НЬЮТОНА

В статье представляется альтернативный подход для определения границ области существования режима. Определение границ области существования режима необходима для оценки минимального имеющегося запаса по устойчивости. Минимальный запас по устойчивости – это основной критерий, применяемый Системными Операторами, чтобы обеспечивать управляющие воздействия для поддержания устойчивости электроэнергетической системы. Предлагаемый в статье метод является прямым, но обладает преимуществом над традиционными прямыми методами. Он основан на оптимизационной процедуре и позволяет оценить расстояние до границы области существования режима. Описываемый подход основан на использовании обобщенного метода Ньютона и суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. В статье представлена концепция разработанного метода на простых моделях электроэнергетических систем (PV-узел – шины бесконечной мощности, 2 PV-узла – шины бесконечной мощности). Особое внимание в статье уделяется вопросу сходимости предложенного метода.

Ключевые слова: устойчивость электроэнергетических систем, критерии устойчивости, апериодическая статическая устойчивость, запас устойчивости, противоаварийное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование современной интеллектуальной электроэнергетической системы невозможно без выполнения требований по качеству и надежности. Одним из основных показателей надежности энергосистемы является обеспечение нормативных запасов по статической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах. Нормативные запасы используются Системными Операторами разных стран для оценки устойчивости энергосистемы и определения управляющих воздействий для ее обеспечения. Для оценки запасов необходимо определять ближайшие предельные режимы для каждого из исследуемых режимов.

Существующие методы для определения ближайшего предельного режима можно разделить на две группы: прямые методы, связанные с решением оптимизационной задачи [1, 2], подходы, основанные на использовании левого собственного вектора вырожденной матрицы Якоби в предельном режиме [3], и методы, основанные на последовательном утяжелении [4]. В мировой практике более широко распространен метод утяжеления [5, 6]. Кроме перечисленных выше методов для оценки устойчивости все активнее применяется модификация метода, основанного на анализе собственных чисел линеаризованной динамической модели энергосистемы [7-9]. Анализ динамической модели позволяет оценивать как апериодическую, так и колебательную устойчивость. Данный подход успешно применяется для анализа устойчивости распределенной генерации [10].

Прямые методы анализа статической устойчивости заключаются в решении оптимизационных задач. Существуют различные целевые функции, используя которые с различной степенью достоверности и точности можно найти ближайший предельный режим.

Метод утяжеления при поиске предельного режима заключается в изменении узловых мощностей в заданном режиме до достижения границы области суще-

ствования режима и зависит от экспертной оценки наиболее вероятного направления изменения мощностей. Зависимость от заданного направления изменения режима может привести к неточному определению запаса по статической устойчивости.

Методы, основанные на утяжелении, являются удобными для оценки устойчивости «офлайн», однако вычислительно «затратными» для их использования в противоаварийном управлении, требующем оценки статической устойчивости «онлайн». Конечно, существуют различные модификации метода утяжеления для ускорения процедуры оценки запаса по устойчивости онлайн [11, 12]. Эти методы основаны на использовании аппроксимации PV-кривых [11] или на применении нейронных сетей [12], однако они не всегда приемлемы для задач противоаварийного управления.

В этой связи можно предположить, что прямые методы будут лучшим инструментом решения задачи поиска ближайшего предельного режима, но обычные прямые методы [13, 14] не слишком надежны вследствие проблемы начальных приближений и других сложностей [4]. Поэтому необходимо предложить такую процедуру, которая позволит решить обозначенные выше проблемы, обеспечит надежное определение ближайшего предельного режима.

В статье предлагается метод поиска ближайшего предельного режима, основанный на использовании целевой функции – суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. Предлагаемый подход включает в себя определение начальных условий и использование усовершенствованного обобщенного метода Ньютона для надежного определения ближайшего предельного режима. Разрабатываемый метод может применяться для оценки запаса по устойчивости «онлайн» благодаря его высоким эксплуатационным качествам при поиске предельного режима. Метод был протестирован на моделях различных энергосистем для поиска установившегося и предельных режимов и продемонстрировал высокую сходимость к искомым режимам.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ

Авторским коллективом поиск ближайшего предельного режима предлагается осуществлять с помощью прямого метода решения оптимизационной задачи. Евклидово расстояние в пространстве мощностей от режимной точки до границы области существования режима используется для поиска предельного режима, на основании его величины делается вывод о близости границы к режимной точке. Представленные в статье исследования представляют собой развитие традиционного направления исследований Уральской электроэнергетической научной школы [15-17].

В качестве целевой функции используется сумма квадратов невязок уравнений установившихся режимов. То есть математически целевую функцию можно записать как

$$\Phi = \bar{F}(x, y)^T \cdot \bar{F}(x, y), \quad (1)$$

где $\bar{F}(x, y)$ – вектор невязок уравнений установившегося режима (УУР); x – вектор параметров режима (действующих значений и углов напряжений); y – вектор заданных переменных (узловых мощностей и напряжения PV-узлов).

Для систем, состоящих из одних генераторов, используются только невязки по активной мощности, а в вектор параметров режима входят только углы. В случае системы с PQ-узлами целевая функция может быть записана в соответствии с (1); без учета постоянства тангенса φ нагрузки целевая функция представляет собой квадрат невязок УУР по активной и по реактивной мощностям для всех PQ-узлов, а также по активной мощности для PV узлов.

Рис. 1 иллюстрирует предельный режим (БПР) для трехузловой схемы, который можно определить с помощью данной функции, ближайший в евклидовой метрике. Как видно, БПР будет соответствовать ближайшей к установившемуся режиму точке касания окружностью равного уровня границы области существования режима.

Рассмотрим на примере простейшей схемы PV-узел – шины бесконечной мощности (балансирующий узел, далее – ШБМ) целевую функцию и экстремумы. Схема такой энергосистемы приведена на **рис. 2**. Параметры простейшей энергосистемы: напряжения PV-узла ($U_{ген}$) и ШБМ ($U_{сист}$) 110 кВ, индуктивное сопротивление связи $x_{св}$ составляет 10 Ом, пределы по реактивной мощности у PV-узла отсутствуют.

Для данной схемы можно записать следующие уравнения узлового напряжения и целевой функции:

$$\bar{F} = \frac{U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \sin \delta - P_{ген}; \quad (2)$$

$$\Phi = \left(\frac{U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \sin \delta - P_{ген} \right)^2, \quad (3)$$

где δ – угол между напряжениями генератора и системы.

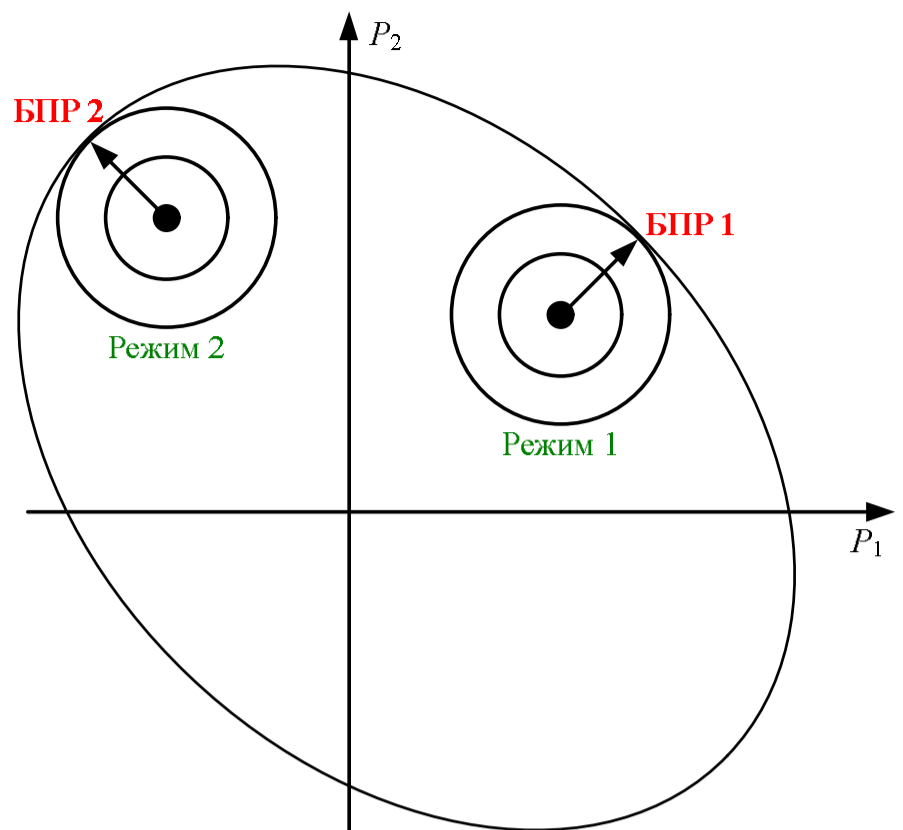


Рис. 1. Иллюстрация оценки БПР

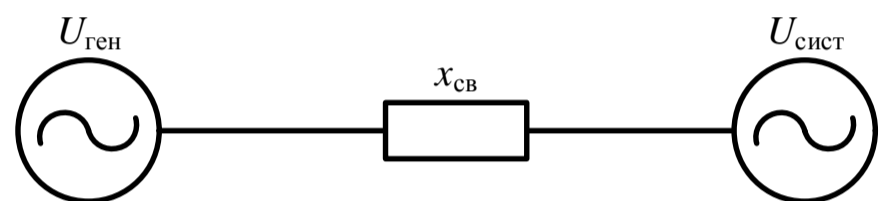


Рис. 2. Схема энергосистемы PV-узел – ШБМ

Задав в качестве генерации в PV-узле 400 МВт, были построены графики невязки УУР и целевой функции в зависимости от угла δ , представленные на **рис. 3**. Как видно из него, точкам устойчивого и неустойчивого равновесия (1 и 3) соответствуют локальные минимумы целевой функции Φ . Точка 2 (максимум пропускной способности сети) совпадает с одним из максимумов целевой функции.

Для нахождения интересующего экстремума, соответствующего максимуму пропускной способности сети, предполагается использовать обобщенный метод Ньютона. Рекуррентная процедура в рамках данного метода для обсуждаемой простейшей энергосистемы может быть записана следующим образом:

$$\Delta x_i f''^{(i-1)} = f'^{(i-1)}, \quad (4)$$

где изменение параметра на итерации $\Delta x_i = x_{i-1} - x_i$; $f'^{(i-1)}$ – первая производная целевой функции Φ , вычисленная на итерации $i-1$; $f''^{(i-1)}$ – вторая производная целевой функции Φ , вычисленная на итерации $i-1$.

Для рассматриваемой энергосистемы первая и вторая производные целевой функции Φ можно записать в следующем виде:

$$f' = \left(\frac{U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \right)^2 \sin 2\delta - \frac{2P_{ген} U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \cos \delta; \quad (5)$$

$$f'' = 2 \left(\frac{U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \right)^2 \cos 2\delta + \frac{2P_{ген} U_{сист} U_{ген}}{x_{св}} \sin \delta. \quad (6)$$

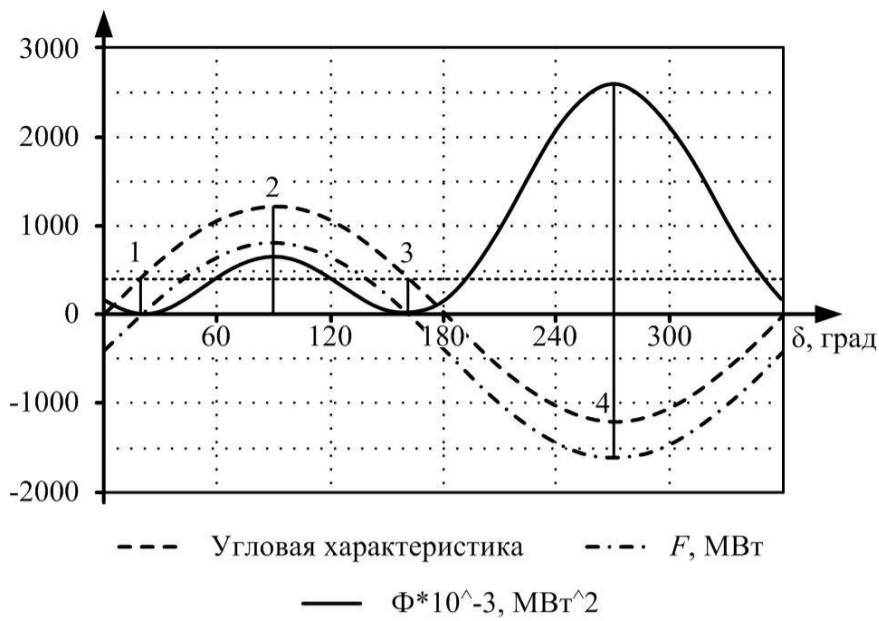


Рис. 3. Угловая характеристика и целевая функция для энергосистемы PV-узел – ШБМ

Графики первой и второй производной целевой функции от угла между векторами напряжений генератора и системы (при генерации 400 МВт) приведены на рис. 4. Также на нем приведены зоны сходимости к различным экстремумам в зависимости от знаков производных (зоны выделены черным цветом). Как можно увидеть, для достижения предельного с точки зрения возможной передачи мощности от генератора в систему режима в качестве начальных условий необходимо использовать угол из достаточно узкого диапазона, что значительно затрудняет задачу поиска предельного режима. Однако если в итерационную процедуру ввести контроль знака второй производной в форме

$$\begin{cases} f'' > 0, & x_i = x_{i-1} + \Delta x_i; \\ f'' < 0, & x_i = x_{i-1} - \Delta x_i, \end{cases} \quad (7)$$

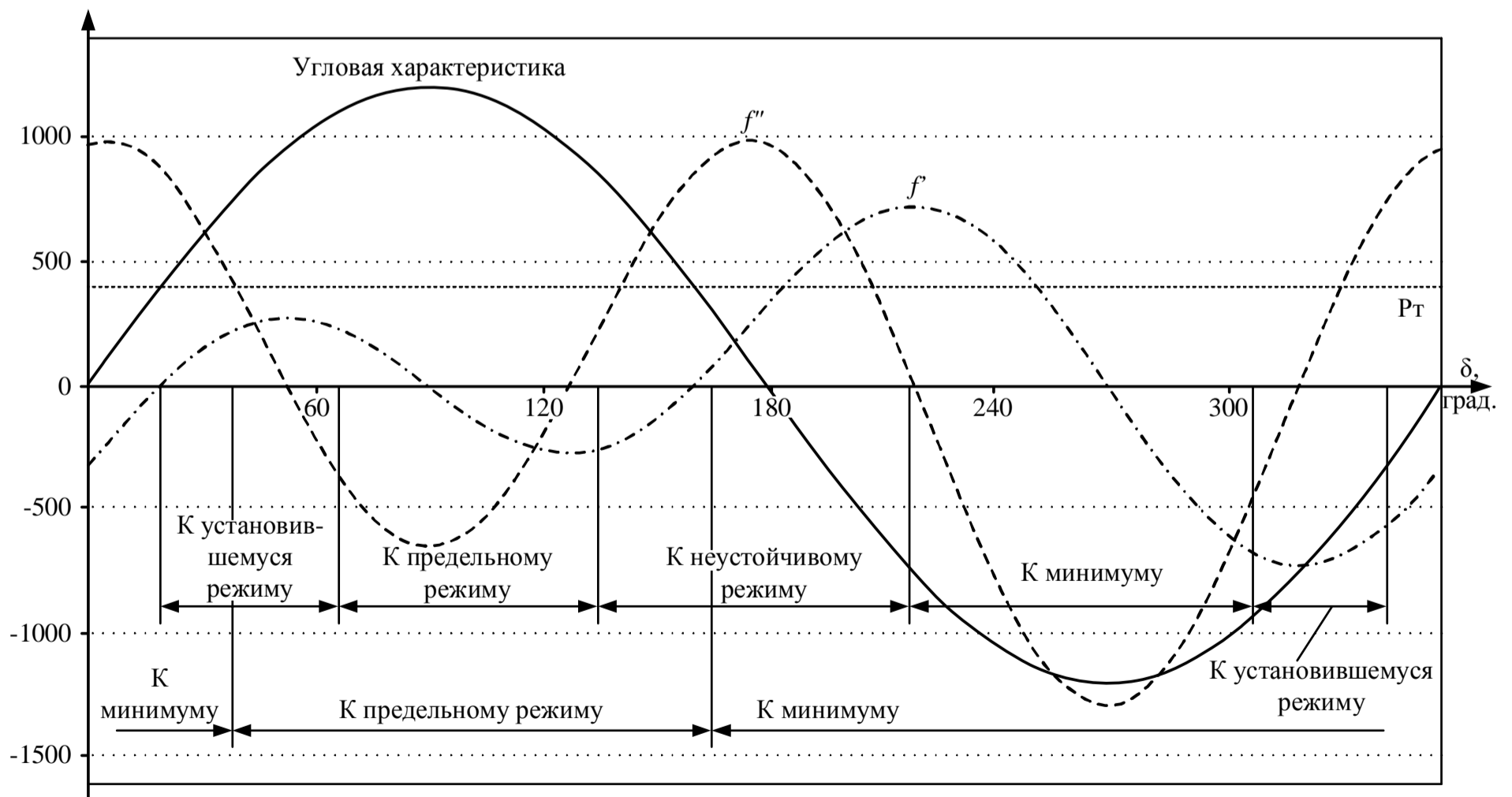


Рис. 4. Области сходимости с учетом и без учета контроля знака второй производной целевой функции

то можно добиться значительного увеличения зоны сходимости к искомому экстремуму целевой функции. Из любого, незначительно утяжеленного по сравнению с исходными 400 МВт генерации, режима можно достичь предельного режима с точки зрения выдачи мощности генератором (новые зоны сходимости изображены на графике внизу).

Еще один способ достижения предельного режима, который не содержит контроля знака второй производной целевой функции f'' в итерационной процедуре, заключается в использовании в качестве начальных условий параметров какого-либо установившегося режима для рассматриваемой системы, а в качестве заданной узловой мощности (хотя бы для одного узла) заведомо недостижимого значения (запредельного, то есть явно находящегося за границами области существования режима в пространстве мощностей). Для тестовой схемы PV-узел – ШБМ для наглядной демонстрации второго подхода зададим генерацию в узле PV 1400 МВт. При этом графики невязки УУР и целевой функции представлены на рис. 5. Как можно увидеть, у целевой функции остается только 2 экстремума: предельному режиму с точки генерации активной мощности соответствует минимум целевой функции, а потенциально возможному максимуму потребления соответствует максимум Φ .

Для завышенного значения генерации графики первой и второй производной целевой функции будут выглядеть так, как показано на рис. 6. Как видно из представленных на нем областей сходимости, параметры, соответствующие установившимся режимам с выдачей генерации в сеть, попадают в область притяжения к пределу по выдаче генерирующей мощности.

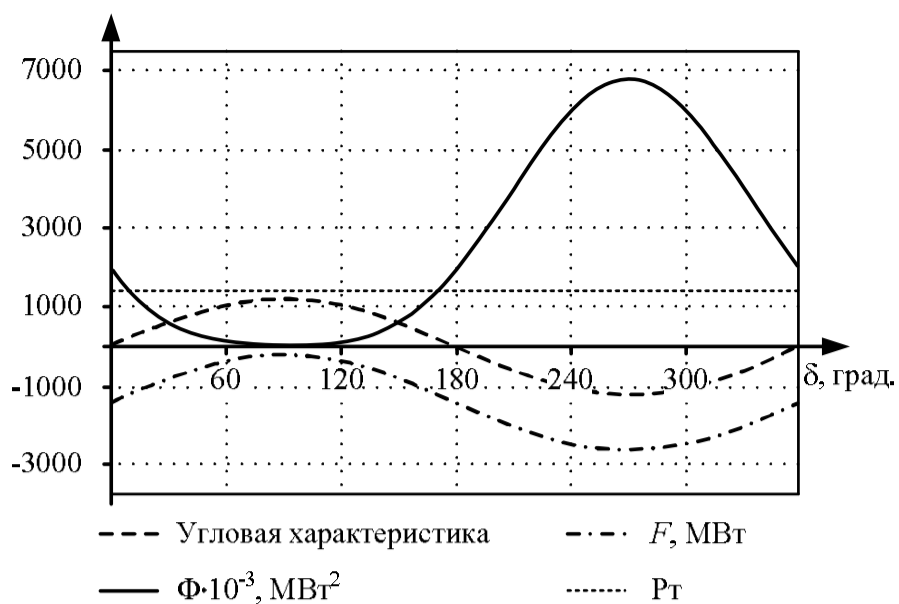


Рис. 5. Угловая характеристика и целевая функция для энергосистемы PV-узел – ШБМ с запредельной величиной мощности генерации

При оценке области сходимости к искомому экстремуму необходимо учитывать недопустимость чрезмерно больших шагов в ходе итерационного процесса, так как в их результате можно выйти за границы области притяжения интересующего экстремума даже при наличии подходящих начальных условий.

Предотвратить данную проблему можно с помощью использования ограничения по максимальной величине шага (сделать это можно, как ограничив абсолютную величину шага, так и относительную величину (за базу принимая величину параметров режима на шаге $i-1$)).

При переходе к многомерному случаю ближайшему предельному режиму целевой функции (1) будет соответствовать седловая точка, так как значение целевой функции будет возрастать до достижения границы области существования режима, а по ее достижению – убывать. При этом БПР будет соответствовать точке касания линии равного значения целевой функции гра-

нице области существования режима. При переходе к многомерному случаю по аналогии с (4) рекуррентная формула для итерационной процедуры поиска экстремума целевой функции, соответствующего ближайшему предельному режиму, будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{H}^{(i-1)} \Delta \bar{x}_i = \nabla^{(i-1)}, \quad (8)$$

где \mathbf{H} – матрица вторых производных целевой функции по параметрам режима \bar{x}_i ; \bar{x}_i – вектор параметров режима (углов для всех PV и PQ-узлов, а также напряжения PQ-узлов); ∇ – градиент (вектор первых производных по параметрам режима \bar{x}_i) целевой функции.

Для обеспечения надежной сходимости итерационной процедуры, по аналогии с изменением итерационной процедуры для энергосистемы PV-узел-ШБМ, при заданных начальных узловых мощностях внутри области существования режима, предлагается использовать следующее выражение:

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n - \Delta X_{n+1}, \\ \text{если матрица } \mathbf{H} \text{ положительно или} \\ \text{отрицательно определена;} \\ X_{n+1} = X_n + \Delta X_{n+1}, \\ \text{если матрица } \mathbf{H} \text{ знаконеопределенная,} \end{cases} \quad (9)$$

то есть изменение вносится в итерационную процедуру на основании критерия Сильвестра. Этот критерий говорит о том, что в окрестности максимума матрица \mathbf{H} отрицательно определена, в окрестностях минимума эта же матрица положительно определена, а вблизи седловой точки матрица Гессе знаконеопределенная.

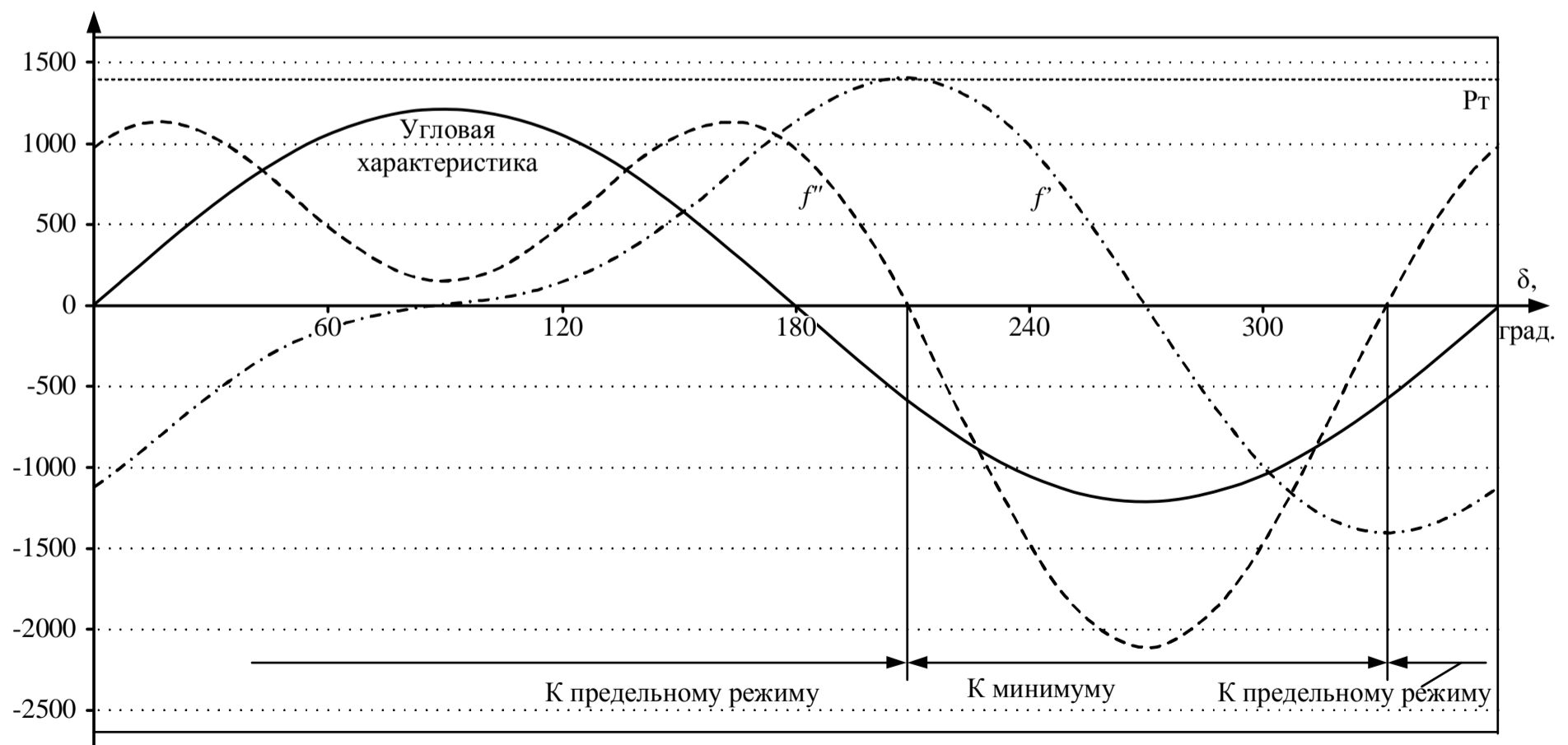


Рис. 6. Области сходимости для энергосистемы PV-узел – ШБМ с запредельной величиной мощности генерации

Также для обеспечения сходимости предлагается использовать укорочение шага итерации: либо ограничив абсолютную величину шага, либо относительную (за базу принимая величину параметров режима на шаге $i-1$).

Рассмотренный выше подход исследовался на примере трехузловой энергосистемы и был представлен в статье [18]. Тестирование производилось для схемы, представленной на **рис. 7**. Параметры схемы следующие: $z_{12} = z_{13} = z_{23} = 5 + j20$ Ом, емкостная проводимость каждой линии 130 мкСм, напряжения генераторов и системы – 231 кВ. При этом мощность первого генератора в установившемся режиме равна 300 МВт, а второго – 600 МВт. Для трехузловой схемы целевая функция Φ может быть записана в виде

$$\Phi(\delta_1, \delta_2) = f_{Gen1}^2(\delta_1, \delta_2) + f_{Gen2}^2(\delta_1, \delta_2). \quad (10)$$

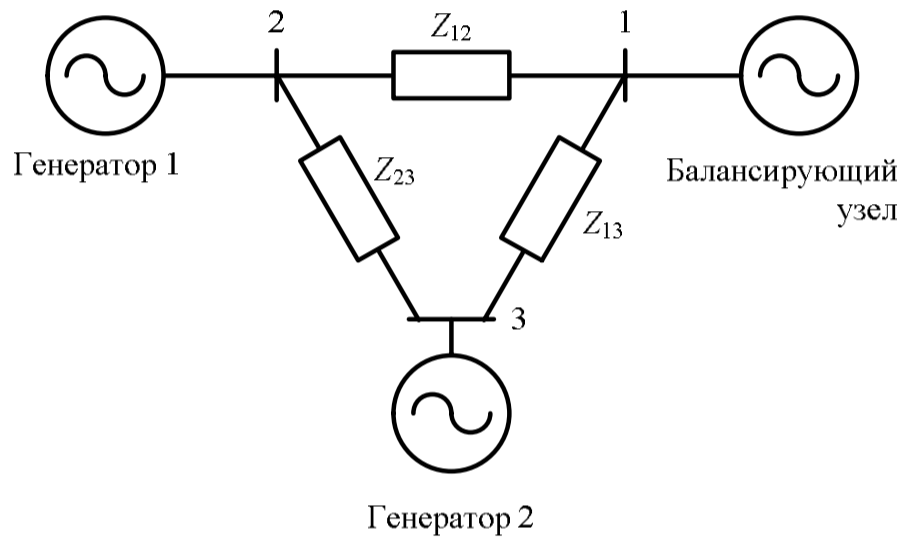


Рис. 7. Трехузловая система

Соответствующий целевой функции (10) при заданном начальном режиме контурный график показан на **рис. 8**. На нем легко можно увидеть, что минимум целевой функции соответствует точке установившегося режима, седловые точки соответствуют ближайшим точкам на границе области существования режима (с разных ее сторон), а два локальных максимума – это две наиболее удаленные от установившегося режима точки на границе области существования режима.

Данные свойства (экстремумы) указывают на возможность применения целевой функции для нахождения ближайшего предельного режима для сложных энергосистем. Главная проблема при этом поиске заключается в том, чтобы обеспечить сходимость к седловой точке, а не к минимуму или максимуму. Описанные ранее модификации обобщенного метода Ньютона позволяют добиться достаточно надежной сходимости к искомому ближайшему предельному режиму (седловой точке).

На **рис. 9** представлена область сходимости предлагаемого метода для трехузловой схемы. Любые начальные условия из нее будут приводить нас в седловую точку, которая соответствует ближайшему предельному режиму. Можно отметить, что область сходимости имеет достаточно большие размеры, охватывает заметную часть пространства углов. Другая важная деталь, которую нужно отметить: точка установившегося режима не входит в эту область. Однако даже небольшое смещение в сторону от этой точки обеспечивает надежную сходимость к точке ближайшего предельного режима, что подтверждает применимость разработанного подхода.

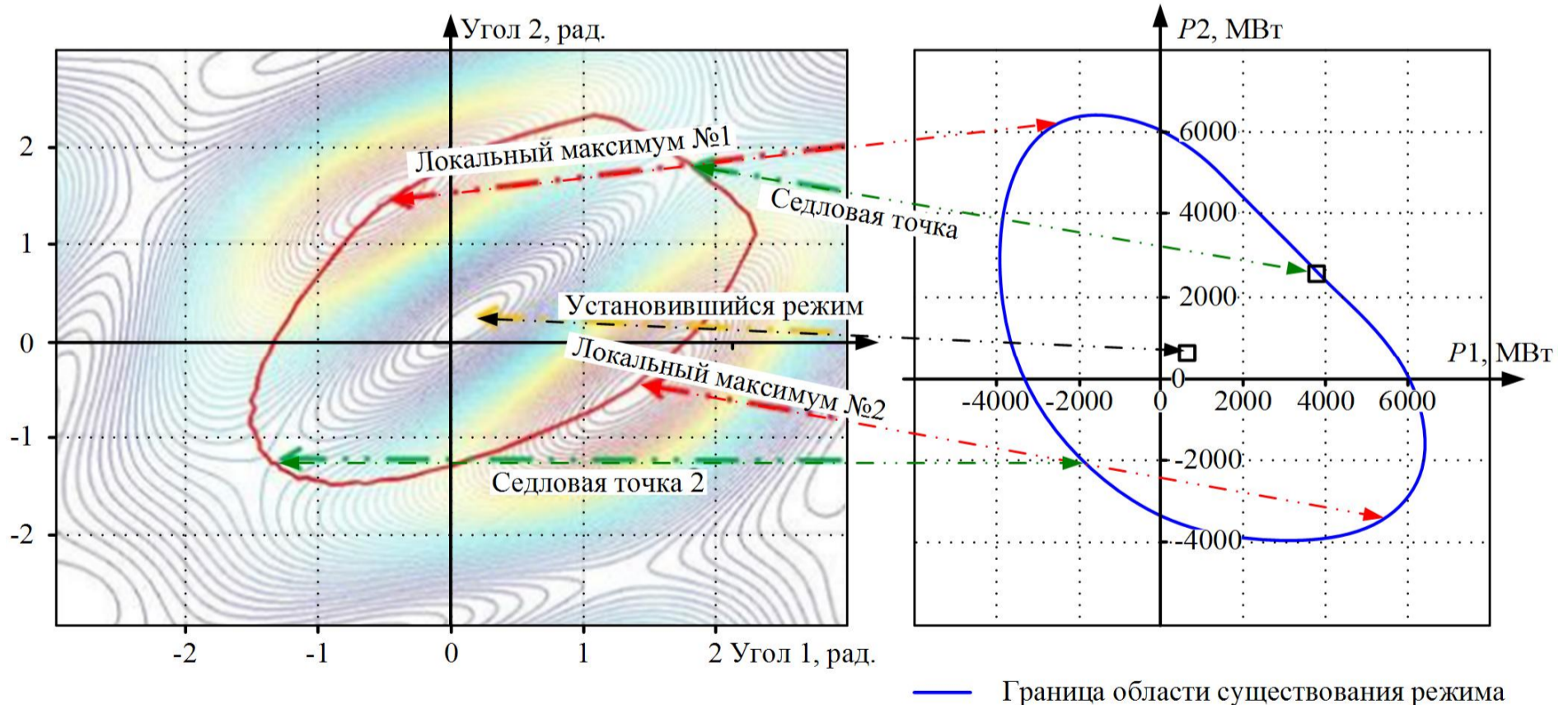


Рис. 8. Целевая функция для системы PV-узел-ШБ

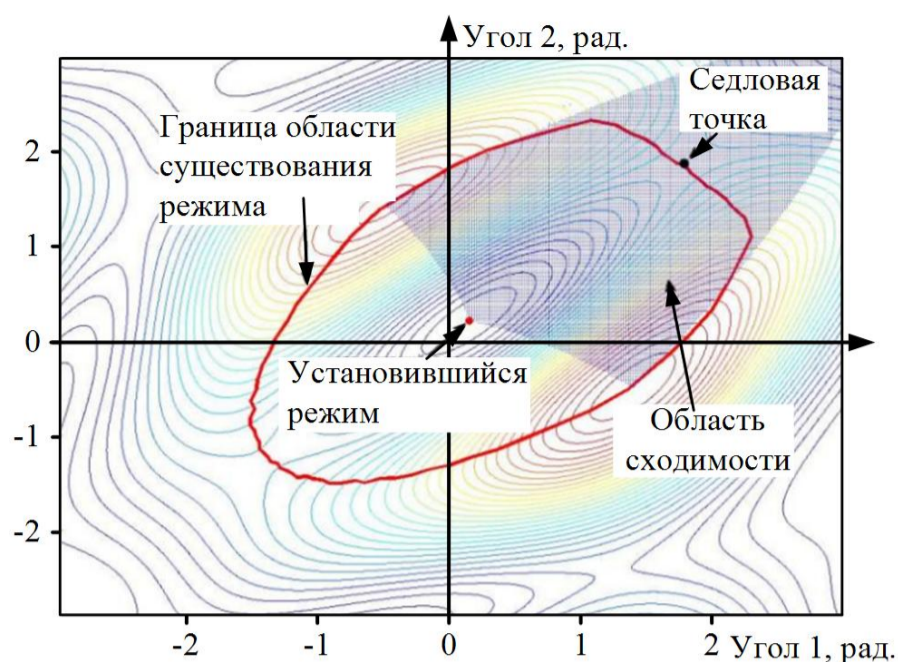


Рис. 9. Область сходимости предложенного метода для трехузловой схемы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан подход к расчету ближайшего предельного режима работы энергосистемы на основе поиска седловой точки функции, состоящей из суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. Анализируется область сходимости метода к предельному режиму при движении к пределу «изнутри» области существования решения. Исследования направлены на получение модели, которая позволит оптимизировать противоаварийное управление в электроэнергетике и более эффективно решать задачу мониторинга запасов устойчивости. Развитие описанного метода заключается в учете ограничений в форме равенств с помощью метода Лагранжа, а ограничений в форме неравенств с помощью метода Каруша-Куна-Таккера или метода штрафных функций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00404 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Models of Closest Marginal States of Power Systems in p-Norms // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. №33(2). P. 1195–1208.
2. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Fast and Reliable Method of Searching Power System Marginal States // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. №31(6). P. 4525–4533.
3. Dobson I., Lu L. New method for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. №8(3). P. 905–913.
4. Milano F. Power System Modeling and Scripting // Power Systems 2009: Springer. 2009.

5. Ajarapu V., Christy.C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 1992. № 7(1). P. 416–423.
6. Chiang H.D., Flueck.A.J., Shah K.S., Balu N. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations // IEEE Transactions on Power Systems. 1995. №10(2). P. 623–634.
7. Mendoza-Armentaa S., Fuerte-Esquivelb C.R., Becerril R. A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems // Electric Power Systems Research. 2013. №101. P. 102-109.
8. Razmi H., Shayanfar H.A., Teshnehlab M. Steady state voltage stability with AVR voltage constraints // Electrical Power and Energy Systems. 2012. №43. P. 650-659.
9. Hongjie J., Xiaodan Y., Xiaodong C. Impact of the exciter voltage limit to small signal stability region of a three-bus power system // Electrical Power and Energy Systems. 2011. №33. P. 1598-1607.
10. Azadani E.N., Canizares C.A., Bhattacharya K. Modeling and Stability Analysis of Distributed Generation // IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012. 2012. P. 1–8.
11. Pama A., Radman G. A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves // Electric Power Systems Research. 2009. № 79. P. 653-659.
12. Gu X., Canizares C.A. Fast prediction of loadability margins using neural networks to approximate security boundaries of power systems // Generation, Transmission & Distribution, IET. 2007. № 1(3). P. 466–475.
13. Canizares C.A. Calculating Optimal System Parameters to Maximize the Distance to Saddle-Node Bifurcation // IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications. 1998. № 45(3). P. 225–237.
14. Avalos R.J., Canizares C.A, Milano F., Conejo A.J. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers. 2009. №56(1). P. 210-223.
15. Pazderin A., Yuferev S. Power flow calculation by combination of Newton-Raphson method and Newton's method in optimization // Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 200. 2009. P. 1693-1696.
16. Pazderin A.V, Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System by the Newton's method in optimization // Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Powertech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid Of the Future. 2009. P. 5281830.
17. Паздерин А.В., Юферев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 5-6. С.68-77.
18. Определение запасов устойчивости и управляющих воздействий для обеспечения статической устойчивости в задаче противоаварийного управления на основе Обобщенного метода Ньютона / Чусовитин П.В., Паздерин А.В., Шабалин Г.С., Юферев С.В. // Материалы Международной научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017». 2017. С. 1-9.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SEARCH OF A CLOSEST LIMIT LOAD OPERATION MODE OF A GRID ON THE BASIS OF GENERALISED NEWTON METHOD

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

Pavel V. Chusovitin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: pvchus@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5885-4821>.

Grigoriy S. Shabalin

Engineer of 1st category, Assistant Professor, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: g.s.shabalin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0776-011X>.

The paper presents an alternative approach to voltage stability boundaries evaluation. Voltage stability boundaries evaluation is necessary for assessment of minimum security margin. Minimum security margin is a basic criterion applied by System Operators to provide corrective actions for maintaining power system security. The proposed method is direct but has advantages over conventional direct methods. It is based on optimization technique and makes it possible to evaluate the distance to power system voltage stability boundary. The described approach is based on the use of the Newton's method and sum of square roots of power flow equations. The paper demonstrates the concept of the approach based on simple power system models (PV-node – swing-bus, 2PV-node – swing-bus). The issue of the proposed method convergence is given special attention to in the article.

Keywords: power systems stability, stability criteria, voltage stability, stability margin, emergency control.

REFERENCES

1. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Models of Closest Marginal States of Power Systems in p-Norms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, no.33(2), pp. 1195–1208.
2. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Fast and Reliable Method of Searching Power System Marginal States. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, no. 31(6), pp. 4525–4533.
3. Dobson I., Lu L. New method for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, no. 8 (3), pp. 905-913.
4. Milano F. Power System Modeling and Scripting. *Power Systems 2009: Springer*, 2009.
5. Ajjarapu V., Christy.C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, no. 7(1), pp. 416–423.
6. Chiang H.D., Flueck.A.J., Shah K.S., Balu N. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, no. 10(2), pp. 623–634.
7. Mendoza-Armentaa S., Fuerte-Esquivelb C.R., Becerril R. A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, no. 101, pp. 102-109.
8. Razmi H., Shayanfar H.A., Teshnehlab M. Steady state voltage stability with AVR voltage constraints. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, no. 43, pp. 650-659.
9. Hongjie J., Xiaodan Y., Xiaodong C. Impact of the exciter voltage limit to small signal stability region of a three-bus power system. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, no. 33, pp. 1598-1607.
10. Azadani E. N., Canizares C.A., Bhattacharya K. Modeling and Stability Analysis of Distributed Generation. *IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012*, 2012, pp. 1–8.
11. Pama A., Radman G. A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves. *Electric Power Systems Research*, 2009, no. 79, pp. 653-659.
12. Gu X., Canizares C.A. Fast prediction of loadability margins using neural networks to approximate security boundaries of power systems. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2007, no. 1(3), pp. 466–475.
13. Canizares C.A. Calculating Optimal System Parameters to Maximize the Distance to Saddle-Node Bifurcation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, 1998, no. 45(3), pp. 225–237.
14. Avalos R.J., Canizares C.A, Milano F., Conejo A.J. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2009, no. 56(1), pp. 210–223.
15. Pazderin A., Yuferev S. Power flow calculation by combination of Newton-Raphson method and Newton's method in optimization. *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009*, 2009, pp.1693–1696.
16. Pazderin A.V, Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System by the Newton's method in optimization. *Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Powertech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid Of the Future*, 2009, pp. 5281830.
17. Pazderin A.V, Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System using Newton's method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of higher educational institutions. Energy issues]*, 2008, no. 5-6, pp.68-77.
18. Chusovitin P.V., Pazderin A.V, Shabalin G.S., Yuferev S.V. Determination of stability margins and controlling actions to ensure steady-state stability in the emergency control task using Newton's method. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Relejnaya zashhita i avtomatika ehnergosistem 2017 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Relay Protection and Automation of Power Systems 2017"]*, 2017, pp. 1-9.

Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С. Поиск ближайшего предельного режима электроэнергетической системы на основе обобщенного метода ньютона // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1(42). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-12-18)

Pazderin A.V., Chusovitin P.V., Shabalin G.S. Search of a Closest Limit Load Operation Mode of a Grid on the Basis of Generalised Newton Method. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2019, no. 1(42), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-12-18)