

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

БАЛАМЕТОВ А.Б., ХАЛИЛОВ Э.Д., АХУНДОВ И.Ш.

*Азербайджанский научно-исследовательский институт Энергетики и
Энергетического Проектирования.*

В практике расчета режимов электрических сетей встречаются случаи, когда невозможно получить решение задачи установившегося режима известными методами и программами. В данной статье рассматриваются вопросы разработки интегрированной системы расчета установившихся режимов на основе современных информационных технологий, позволяющих выявлять причины несходимости итерационного процесса и подбирать соответствующие алгоритмы и методы решения задачи.

Модернизация программно-вычислительных комплексов расчета установившихся режимов электроэнергетических систем (РУРЭС) на основе современных информационных технологий с организацией единой базы данных и диалогового режима работы, развитыми сервисными функциями, более совершенным обменом информацией является важной задачей. Предлагается разработать интегрированную систему РУРЭС на основе единой системы управления базами данных и информационных технологий.

Разработка эффективных методов решения уравнений установившегося режима (УУР) является объектом исследования многих авторов [1-7].

В практике проектирования и эксплуатации ЭЭС кроме задач анализа нормальных режимов часто возникают задачи исследования утяжеленных и предельных УР. Однако пока не существуют методы и программы расчета УР, обладающие универсальными характеристиками, т.е. быстрой и надежной сходимостью в различных ситуациях.

В настоящее время в программах расчета установившегося режима, эксплуатируемых в энергосистемах, в основном, используются методы Ньютона, Зейделя и их модификации. Практика использования программ, основанных на этих методах, выявила следующие их свойства. Программы, основанные на методе Ньютона, обладают надежной сходимостью, но требуют большой памяти ЭВМ, и эффективность их достигается при высоком уровне программирования. Программы, основанные на методе Зейделя, требуют малой памяти, легко программируются, но имеют медленную сходимость. Следует отметить особенно медленную сходимость или несходимость итерационного процесса для схем с сильно отличающимися по величине сопротивлениями и с продольными и поперечными емкостными сопротивлениями, присущими ЛЭП СВН.

Факторы, приводящие к несходимости решения уравнений установившегося режима. Для современных электрических систем характерно наличие воздушных линий (ВЛ) сверхвысоких напряжений (СВН), устройств продольной компенсации, трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов с малым сопротивлением обмотки среднего напряжения. Для таких систем при расчетах установившихся режимов необходимые условия сходимости метода Гаусса-Зейделя могут не выполняться.

Для ВЛ СВН присущи такие особенности, как большие длины, большие емкостные проводимости на землю, углы между напряжениями по концам ВЛ, близость предельной по статической устойчивости мощности к натуральной мощности ВЛ, большие потери мощности на корону, увеличение зарядной мощности в связи с коронированием проводов. Указанные факторы приводят к замедлению сходимости и несходимости решения уравнений установившегося режима. Расчеты установившихся режимов в задачах реального времени: определения допустимой области, контроля допустимости и ввода режима в допустимую область, контроля оперативной надежности и оптимизации уровня надежности, контроля экономичности и коррекции режима требуют применения алгоритмов быстрого потокораспределения. Поэтому разработка алгоритмов и программ расчета установившихся режимов ЭС с ВЛ СВН, обеспечивающих высокую надежность сходимости и быстродействие, является актуальной.

Наиболее часто встречающимися в практике РУРЭС причинами отсутствия решения известными методами и программами являются следующие.

1. Ошибки в задании исходной информации.
2. Плохо обусловленная система уравнений: большие числа обусловленности; плохие измерения; резко отличающиеся сопротивления; наличие ВЛ СВН.
3. Режим, близкий к предельному по статической устойчивости.
4. Нет решения. Система нелинейных уравнений УР несовместна.
5. Наличие нескольких решений, а также технически недопустимых.
6. Элементы, приводящие к нарушению необходимых и достаточных условий сходимости метода РУРЭС: отрицательные и резко отличающиеся сопротивления; неоднородность ЭС; начальные приближения зависимых переменных далеки от решения.

Модуль контроля исходной информации. На основе информации об узлах и ветвях сети в данном модуле производится: проверка наличия балансирующего узла, обнаружение повторяющихся узлов, обнаружение узлов, не связанных с другими узлами (контроль топологии сети), проверка повторения узла в начале и в конце ветви, проверка правильности задания коэффициентов трансформации, задания начального приближения по напряжению в начале и конце ветви без трансформатора, проверка правильности задания пределов и начального приближения по напряжению и реактивной мощности в узлах, приближенная проверка баланса активных и реактивных мощностей в целом по электрической сети, выявление существенных ошибок, при наличии которых расчет заведомо невозможно осуществить. После окончания работы модуля контроля исходной информации выдаются соответствующие сообщения.

Модуль предварительного анализа режима и выявления причин отсутствия решения. Данный модуль включает алгоритмы обнаружения наличия в схеме сети элементов, приводящих к замедлению и нарушению необходимых и достаточных условий сходимости метода: отрицательные сопротивления, малые и резко отличающиеся сопротивления, неоднородность ЭС, определения близости режима к предельному по статической устойчивости, выявления несовместности системы нелинейных уравнений.

Определение обусловленности системы УУР. Расчет УР сводится к решению системы нелинейных уравнений. Решение УУР методом Ньютона в матричном виде представляется следующим образом

$$\begin{vmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H & N \\ M & L \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{vmatrix} \quad (1)$$

или в сокращенном виде $\Delta W = A \cdot \Delta X$, где ΔW - вектор небалансов активной и реактивной мощностей, и ΔX - вектор поправок к напряжениям и углам узлов, H, N, M, L - подматрицы Якобиана, являющиеся частными производными первого порядка небалансов активной и реактивной мощностей по U и $\Delta\delta$, A - полная матрица Якоби.

Для качественной характеристики связи между погрешностями правой части и решения систем уравнений пользуются мерами обусловленности матрицы системы. Мера обусловленности матрицы A определяется по часто применяемой формуле. Тогда $\rho = |\lambda_{\max}| / |\lambda_{\min}|$, где λ_{\max} и λ_{\min} - собственно наибольшее и наименьшее собственные значения матрицы A. Определение чисел обусловленности для больших систем уравнений связано с большими вычислительными трудностями. На практике обусловленность матрицы A определяют по близости к нулю главного определителя $\det A^0$ нормированной матрицы A^0 , либо по отношению $\mu = \Delta(A) / \det A$, где $\Delta(A)$ - оценка Адамара. Если диагональный элемент на k-ой итерации триангуляции становится очень малым, то это свидетельствует о плохой обусловленности исходной матрицы A и может привести к большим ошибкам в расчетах.

Выбор метода решения УУР. Наиболее широкое применение для РУРЭС нашли методы, в основе которых лежит метод Ньютона. При анализе режимов в различных предельных состояниях (дефицитные по активной и реактивной мощностям, с низкими уровнями напряжения, при наличии слабых связей или при резкой неоднородности элементов схемы замещения) метод Ньютона часто не обеспечивает сходимости решения. Это объясняется тем, что в некоторой точке вычислительного процесса матрица Якоби становится вырожденной или система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) плохо обусловленной, поправки к вектору X вычисляются с большими погрешностями.

Для обеспечения сходимости метода Ньютона при РУР в таких условиях требуется сначала улучшить исходное приближение вектора X, а затем переходить к методу Ньютона. В качестве методов, улучшающих исходное приближение для метода Ньютона, использовались методы с менее жесткими условиями сходимости, такие, как градиентный, Гаусса-Зейделя, метод центров - эллипсов, сочетающий метод Ньютона. Метод вторичной коррекции для этих целей обладает лучшими свойствами.

Сходимость любого численного метода обеспечивается, если на каждом шаге итеративного процесса выполняется условие

$$\|W(X^{k-1})\| < \|W(X^k)\|, k = 1, 2, \dots$$

где \bullet - любая из норм матрицы.

С учетом этого условия строятся

$$\|W(X^{k-1})\| < \lambda_k \|W(X^k)\|, k = 1, 2, \dots, 0 < \lambda \leq 1. \quad (2)$$

алгоритмы определения допустимых и оптимальных шагов деформации.

Различные модификации метода решения уравнений вида (2) отличаются способами выбора параметра, и называются методом Ньютона по параметру [3], квазиньютоновским методом [2], методом последовательных интервалов (МПИ), усовершенствованным методом последовательных интервалов (УМПИ) [3].

Оценка оптимальных и допустимых шагов, удовлетворяющая условию (2), широко применяется в работах [1-3] и др., так как позволяет расширить область сходимости РУРЭС методом Ньютона вплоть до границы существования. При этом в каждой точке вычислительного процесса выбирается λ_k из следующих условий $\lambda_k^{\text{доп}} = 1$, если $\lambda_k \geq 1$, $\lambda_k^{\text{доп}} = \lambda_k$, если $\lambda_k < 1$ где

$$\lambda_k = \frac{2\|W(X^k)\|}{h \cdot \left\| \sum_{j,l} \frac{d^2 W(X^k)}{dX_j dX_l} \partial X_j^k \partial X_l^k \right\|},$$

Здесь h - остаточный член разложения шага в ряд Тейлора, т.е. производные выше второго порядка упрощенно учитываются через величину h .

В [2] в качестве основного варианта выбора параметра принята минимизация суммы квадратов небалансов мощностей.

Если в некоторой точке вычислительного процесса матрица Якоби близка к вырожденной или система линеаризованных уравнений плохо обусловлена, то поправки в методе Ньютона, также направление изменения зависимых переменных, вычисляется с большой погрешностью [1]. Вследствие этого сходимость к искомому физическому реализуемому решению будет невозможна. Поэтому для метода Ньютона применяется регуляризованный процесс, в котором для поправок вектора X решается СЛАУ.

В таких ситуациях в математической литературе предлагается использовать различные регуляризованные алгоритмы. Так, для метода Ньютона применяется регуляризованный процесс, в котором для поправок вектора X решается СЛАУ, отличная от (2)

$$\frac{dW(X^k)}{dx} + w_k = -W(X^k), k = 0, 1, \dots$$

где оператор w_k - выбирается таким образом, что матрица $\frac{dW(X^k)}{dx} + w_k$ не вырождена.

При ухудшении обусловленности СЛАУ или вырожденной матрицы Якоби необходимо использовать методы, улучшающие свойства матриц. В качестве такого средства при РУРЭС можно применять квазирегуляризацию, основанную на изменении матрицы Якоби в процессе Гауссовского исключения. При этом корректировка осуществляется таким образом, что расширяет область сходимости к решению, и за счет небольшого увеличения трудоемкости, по сравнению с этими методами, увеличивается и быстродействие. Квазирегуляризованный метод Ньютона сочетает приемы регуляризации с методом Ньютона.

Улучшение свойств УУР специальным эквивалентированием. Наличие жестких связей, т.е. эквивалентные проводимости между узлами существенно больше всех остальных ветвей, подходящих к любому из этих узлов, приводит к ухудшению сходимости УУР. Такая пара узлов представляет собой физически одно целое. Специальные алгоритмы объединения таких узлов повышают надежность сходимости итерационного процесса. За счет снижения размерности дополнительно уменьшается время решения УУР.

Учет сложных соединений ветвей нулевого сопротивления. Ветви с нулевыми сопротивлениями представляют собой шиносоединительные выключатели, секционные выключатели, выключатели линий, трехобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы. Повышение надежности сходимости итерационного процесса можно добиться объединением доитерационного процесса ветвей между собой с нулевыми сопротивлениями в один узел. После окончания итерационного процесса потоки в ветвях с нулевыми сопротивлениями определяются по специальным алгоритмам.

Часто считается, что чем точнее модель отражает реальный объект, тем более точны результаты расчета по этой модели. В [3] показывается, что применительно к моделям ЭЭС это справедливо далеко не всегда. Ниже рассматриваются некоторые из алгоритмов получения решения на основе искажения модели РУРЭС.

Один из методов регуляризации сводится к искусственному увеличению диагональных элементов матрицы (искажение модели), что позволяет уменьшить числа обусловленности и соответственно получить лучший по точности результат.

Другой прием искажения модели с целью получить более высокую точность результата [3] при решении СЛАУ заключается в объявлении строки с диагональными элементами $a_{ii} < \varepsilon$ нулевой и переносе ее в конец системы уравнений. Процедура закругления модели заданием порога ε и приведением плохо обусловленной задачи была названа ε - эквивалентированием.

Принцип статистической незначимости. Вклад погрешностей отдельных компонент исходных данных в погрешность результата, получаемого по модели, различен. Если вклад i -ой компоненты вектора в погрешность статически незначим по сравнению с суммарным эффектом, тогда информация об i -ой компоненте может быть исключена из рассмотрения. Одним из алгоритмов получения решения УУР является частичное эквивалентирование схемы замещения. При помощи эквивалентирования участков схемы замещения с элементами большой разнородности отношения сопротивлений и проводимостей можно улучшить обусловленность систем уравнений и получить решение [3].

В [4] исследованы вопросы сходимости итерационного процесса решения УУР ЭС с ВЛ СВН (500,750, 1150 кВ). Установлено, что при задании P и Q в узлах ЭС с ВЛ СВН для режимов, далеких от предела по статической устойчивости, сходимость к допустимому решению не обеспечивается. Решение не удается получить (при его существовании) как методами типа Гаусса-Зейделя, так и методами типа Ньютона. Несходимость итерационного процесса решения УУР в указанных случаях является следствием невыполнения условий сходимости. Исследования УУР с ВЛ СВН показывают, что решение удается получить при задании части узлов типа PU, задании нагрузки статическими характеристиками, неизменным током, задании зарядной мощности, неизменной от напряжения, генерацией реактивной мощности. Для получения сходимости УУР к допустимому решению в этих случаях предлагаются алгоритмы перевода в схеме ЭС некоторых PQ узлов в PU узлы и коррекции напряжения этих узлов по формуле обратной связи.

Использование обобщенных показателей как критерия существования и предельности установившегося режима. В точке решения якобиан УУН равен или близок нулю, то незначительное изменение параметра в направлении утяжеления режима обусловит отсутствие реального решения УУН [10]. Производная потерь активной мощности в сети по некоторому режимному параметру D_i равна [10]:

$$\frac{\partial \pi}{\partial D_i} = \frac{\partial \pi}{\partial D_i} - \left(\frac{\partial \pi}{\partial U'} \frac{\partial \pi}{\partial U''} \right) \begin{pmatrix} \frac{\partial U'}{\partial D_i} \\ \frac{\partial U''}{\partial D_i} \end{pmatrix} = \frac{\partial \pi}{\partial D_i} - \left(\frac{\partial \pi}{\partial U'} \frac{\partial \pi}{\partial U''} \right) J_u^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial W'}{\partial D_i} \\ \frac{\partial W''}{\partial D_i} \end{pmatrix}$$

Здесь π – суммарные потери активной мощности в сети; U' , U'' - активные и реактивные составляющие напряжения в узлах; D_i – изменяющийся параметр; W' , W'' - активные и реактивные составляющие небалансов в узлах; J_u – матрица Якоби узловых уравнений.

Условием существования производной $\partial \pi / \partial D$ будет в этом случае $\det[J_u] \neq 0$. Если же $\det[J_u] = 0$, то в этой точке $\partial \pi / \partial D = \infty$. Установившийся режим системы будет предельным по отклонению какого-либо параметра D , если малые изменения этого параметра вызывают бесконечно большие изменения суммарных потерь мощности в сети.

Обобщенные показатели режима – вторые производные от суммарных потерь активной мощности в сети по контролируемому активному и реактивному перетоку почти постоянны в зоне нормального функционирования ЭЭС, и быстро возрастают в зоне опасных около предельных режимов. При использовании обобщенного показателя возможно определение границы области допустимых режимов для задач оценки надежности УР.

Применение методов искусственного интеллекта (ИИ). Могут быть построены алгоритмы получения технически допустимого решения, основанные на: эвристических подходах поиска решения; на диагностике причин отсутствия решения и в связи с ошибками в задании режима электрической сети и выработке рекомендаций по локализации и устранению ошибок в задании информации о нагрузках узлов. Рассматривается разработка алгоритма анализа несходимости итерационного процесса от близости режима к предельному по статической устойчивости и в связи с ошибками в задании режима электрической сети методами искусственного интеллекта. Качество обучения оценивается минимизацией суммарного небаланса мощностей в ЭЭС [8-9]. Задача РУРЭС сводится к минимизации суммы квадратов небалансов мощностей и напряжений

$$\Psi(X) = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^n w^2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

Функция (3) неотрицательная и ее минимум равен нулю, когда все небалансы равны нулю. Минимизация суммарного небаланса мощности в электрической сети, в связи с большой размерностью и увеличением времени расчета с применением прямых методов нейронной сети без использования дополнительных приемов обучения и базы знаний для улучшения получения решения, представляется трудно выполнимой.

Текущее состояние нейрона определяется, как взвешенная сумма его входов:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad (4)$$

Оптимизация параметров искусственной нейронной сети производится путем минимизации функции обучения (3) по весовым коэффициентам

$$w_i^n = -\lambda \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial w_i} \quad (5)$$

Здесь λ - коэффициент скорости обучения, $0 < \lambda < 1$.

Задача обучения нейронной сети заключается в определении синаптических весов параметров схемы и режима электрической сети.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial \Psi}{\partial y_j} \cdot \frac{\partial y_j}{\partial s_j} \cdot \frac{\partial s_j}{\partial w_{ji}} \quad (6)$$

Часто встречающимися на практике причинами отсутствия решения известными методами и программами расчета установившихся режимов являются ошибки или некорректность в задании исходной информации (нагрузки узлов). Для анализа и выявления некорректных данных в нагрузках узлов и локализации таких узлов можно применить методы жесткого и гибкого искусственного интеллекта.

Критериями обнаружения плохих исходных данных в задании PQ в узлах могут быть узлы с большими значениями небаланса мощности $|P_{небф}| \gg \Delta P_{небз}$, $|Q_{небф}| \gg \Delta Q_{небз}$, $|\Delta U_{ф}| \gg \Delta U_3$ или $\delta > 25^0$.

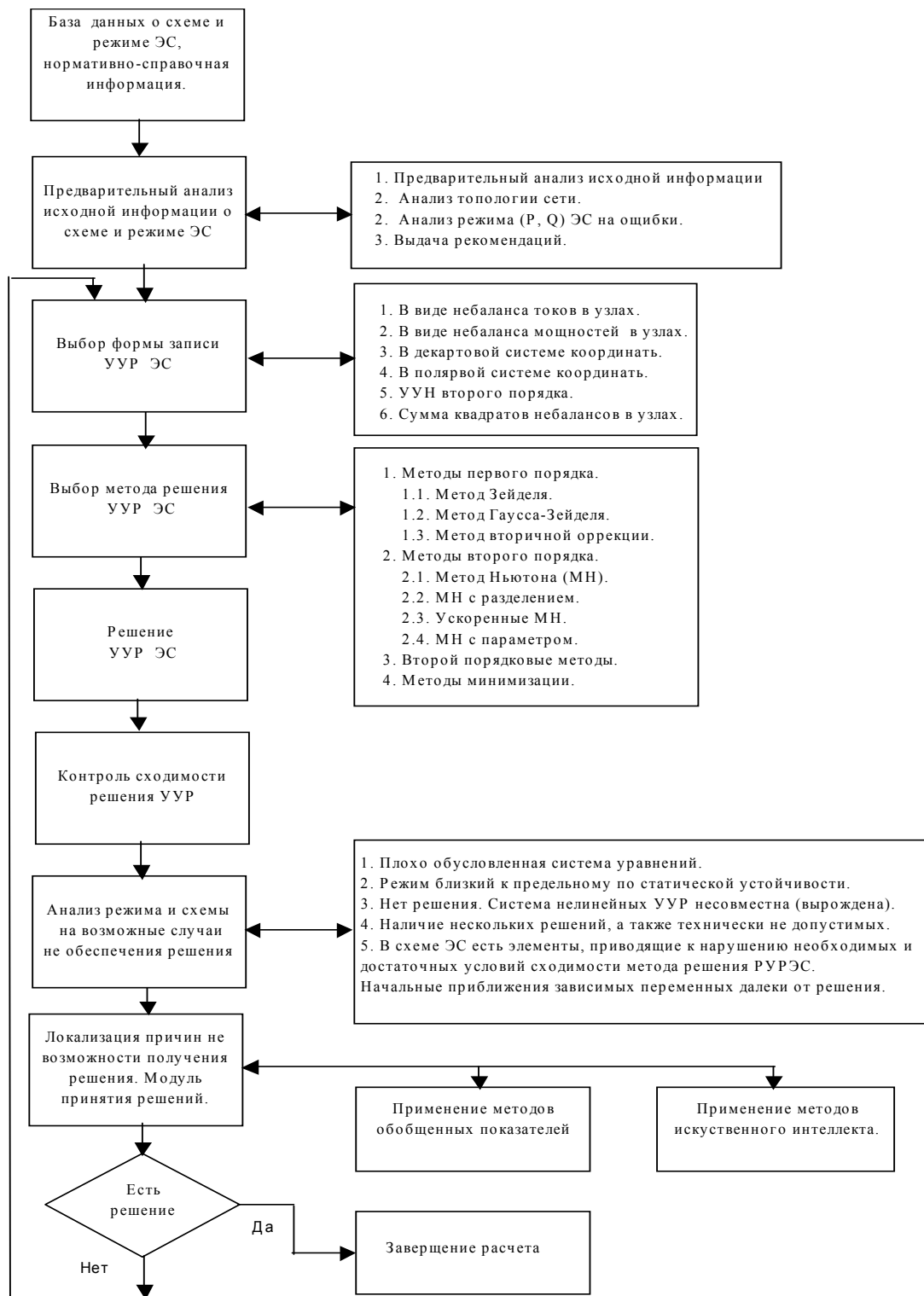


Рис. Блок схема мониторинга РУРЭС.

Алгоритм расчета УР, адаптирующегося к условиям задачи. Общий алгоритм РУР должен быть построен адаптирующимся к условиям задачи и позволяющим наиболее эффективно их решать как в смысле повышения быстродействия, так и в смысле обеспечения надежной сходимости к физически реализуемому решению. При этом могут быть применены алгоритмы получения технически допустимого решения, основанные на диагностике причин отсутствия решения и выборе методов:

модификация полного метода Ньютона с точным выбором оптимального шага; переход к новой форме математического описания задачи и на оптимизационные подходы ввода режима в допустимую область с применением методов обобщенного приведенного градиента, методов квадратичного программирования; регуляризации; ϵ - эквивалентирования; статистической незначимости; эвристические подходы поиска решения; частичного и адаптивного эквивалентирования.

Блок- схема построения адаптивного РУР приведена на рисунке.

Заключение

1. Общий алгоритм РУР должен быть построен адаптирующимся к условиям задачи и эффективным как в смысле повышения быстродействия, так и в смысле обеспечения надежной сходимости к физически реализуемому решению.

2. Для построения адаптивного алгоритма получения решения актуальной является формализация отдельных этапов: диагностика причин расходимости или отсутствия решения на основе анализа исходных данных, схемы и режима до и в процессе решения УУР, условия применения специальных алгоритмов с выбором формы записи уравнений УР и метода решения.

3. Предложены принципы разработки интегрированной системы расчета установившихся режимов, позволяющие выявлять причины несходимости итерационного процесса, и подбор соответствующих методов и алгоритмов решения задачи, облегчающие работу инженера-оператора при принятии решений.

1. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем. Н.А. Мурашко, Ю.А. Охорзин, Л.А. Крумм и др.- Новосибирск: Наука, 1987.

2. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем. Н.А. Мурашко, Ю.А. Охорзин, Л.А. Крумм и др.- Новосибирск: Наука, 1987.

3. Методы оптимизации режимов энергосистем /В.М. Горштейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др.- М.: Энергия, 1981. -366 с.

4. А.З. Гамм. Новые подходы к решению задач диспетчерского управления электроэнергетическими системами. Из.АН СССР. Энергетика и транспорт. 1991, №4 с.12-22.

5. Баламетов А.Б. Об увеличении эффективности расчета установившихся режимов электрических сетей с линиями электропередачи сверхвысоких напряжений. - Электричество, 2004, № 1, с. 13-26.

6. Баламетов А.Б., Мамедяров О.С. Расчет установившегося режима сложных электрических сетей методом Гаусса-Зейделя с вторичной коррекцией. - Электричество, 1985, N 10, с. 7-11.

7. Баламетов А.Б., Мусаханова Г.С. Ускоренные методы расчета установившегося режима. -В кн.: Информационное обеспечение АСДУ ЭЭС. Часть 1, Каунас, 1989, с. 221-228.

8. Баламетов А.Б., Мусаханова Г.С. Методы второго порядка для расчета установившихся режимов энергосистем. //Тр. АзНИИЭ им. И.Г.Есьмана: Управление режимами работы энергосистемы и ее основного оборудования. - Баку, 1990, с. 68-78.

9. Balametov A.B., Musakhanova G.S., Akhundov I.Sh. DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED SYSTEM OF STEADY-STATE STUDIES FOR ELECTRICAL NETWORKS. TPE-2004. Second international Conference Texnikal & Physical Problems in Power Engineering, 6-8 September 2004, Tabriz, Iran. p, 30-34.

10. Баламетов А.Б., Мусаханова Г. С., Ахундов И. Ш. О применении методов искусственного интеллекта для принятия решений в задачах управления режимами энергосистем. Труды II Республиканской научной конференции «Современные

проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий» II Том, Баку-2004, стр. 26-28.

11. *Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х.* Расчет установившихся режимов электрических систем. Ташкент ФАН, 1985, с. 76.

ELEKTRİK SİSTEMLƏRİNİN QƏRARLAŞMIŞ REJİMLƏRİNİN HESABATININ MONİTORİNQİ ÜÇÜN BİRLƏŞMİŞ SİSTEMİNİN İŞLƏNMƏSİ

BALAMETOV Ə.B., XƏLİLOV E.D., AXUNDOV İ.Ş.

Elektrik şəbəkələrinin rejimlərinin hesabatında elə hallara rast gəlinir ki, məlum metodlar və proqramlarla qərarlaşmış rejimin həllini almaq mümkün olmur. Bu məqalədə müasir informasiya texnologiyaları əsasında elektrik şəbəkələrinin qərarlaşmış rejimlərinin hesabatı üçün iterasiya prosesinin dağılmasının səbəblərini araşdırmağa və müvafiq alqoritm və həll üsullarının seçilməsini təmin edən birləşmiş monitoring sisteminin işlənməsi məsələsinə baxılır.

DEVELOPMENT INTEGRATED SYSTEM OF MONITORING OF ACCOUNT THE STEADY-STATE REGIME OF ELECTRIC SYSTEMS

BALAMETOV A.B., HALILOV E.D., AKHUNDOV I.Sh.

In practice of account of modes of electrical networks meet cases when it is impossible to receive the decision of a problem of establishing mode, using known methods and programs. In given article questions of development of the integrated system of account of the established modes are considered on the basis of the modern information technologies, allowing to reveal the reasons not convergence of iterative process and to select the appropriate algorithms and methods of the decision of a problem.