

УДК 621.311

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

БАЛАМЕТОВ А.Б., МУСАХАНОВА Г.С., ХАЛИЛОВ Э.Д.

*Азербайджанский научно-исследовательский институт
Энергетики и Энергетического проектирования*

Одной из задач эксплуатации электроэнергетических систем является повышение управляемости электрических сетей за счет применения различных управляемых элементов, в том числе управляемых реакторов, статических тиристорных компенсаторов и регулируемых под нагрузкой трансформаторов и автотрансформаторов. Управление режимами по напряжению, реактивной мощности и коэффициентами трансформации трансформаторов относится к числу часто решаемых задач электроэнергетических систем. Основными целями этой задачи являются: обеспечение в рабочем процессе напряжения в узлах электрической сети, повышение экономичности и надежности работы электрической сети. В связи с этим важное значение имеют совершенствование и развитие методических основ, информационного и программного обеспечения для решения различных задач оперативного управления режимами энергосистем.

Математическая модель задачи оптимизации электрической сети по напряжению и реактивной мощности формулируется следующим образом:

$$\text{минимизация} \quad F(X, Y), \quad (1)$$

$$\text{при ограничениях} \quad W(X, Y) = 0 \quad (2)$$

$$X_{\min} < X < X_{\max}, \quad (3)$$

$$Y_{\min} < Y < Y_{\max}, \quad (4)$$

где $F(X, Y)$ - суммарные потери активной мощности в электрической сети, X – вектор нерегулируемых переменных (модули напряжения, реактивная мощность генераторов); Y – вектор регулируемых переменных.

Уравнения (2) являются ограничениями в виде равенств и представляют собой уравнения установившихся режимов (УУР). Неравенства (3) представляют действующие в системе ограничения на напряжения узлов, реактивную мощность источников, токи и перетоки мощностей. Неравенства (4) представляют ограничения на регулируемые переменные: напряжения узлов, реактивные мощности источников и коэффициенты трансформации трансформаторов.

В настоящее время для решения задачи, сформулированной выражениями (1-4), обычно используют методы нелинейного программирования [1-3]. На базе этих методов разработаны программы оптимизации режима ЭС.

В условиях большого объема выполняемых расчетов для задач анализа и планирования режимов, высокой скорости выработки управляющих воздействий при оперативном и автоматическом управлении режимами предъявляются повышенные требования к надежности и быстродействию получения решения численными методами. Это требует разработки моделей и численных методов, позволяющих решать задачи в зависимости от необходимой точности решения, производительности

используемых ЭВМ, располагаемых ресурсов времени ЭВМ. Поэтому возникает необходимость применения упрощенных принципов коррекции, которые дают приемлемые результаты при относительно небольших отклонениях исходных условий от планируемых. В связи с этим представляет интерес исследование эффективности применения линеаризованных моделей оптимизации режимов ЭЭС по напряжению и реактивной мощности.

Эффективность решения задачи оптимизации можно повысить за счет применения итеративной процедуры последовательной линеаризации целевой функции и ограничений с использованием методов линейного программирования. Методы линейного программирования для оптимизации режима ЭС обладают следующими достоинствами: общее быстрое действие этих методов значительно выше; позволяют хорошо решать задачи с разными целевыми функциями (по минимальному числу управляемых переменных; по критерию минимума квадратов нарушений режимных ограничений), позволяют решать несовместимые задачи.

Одной из причин, удерживающих применение последовательной линеаризации и линейного программирования для оптимизации режимов ЭС по напряжению и реактивной мощности до настоящего времени, является сильная нелинейность целевой функции в виде суммарных потерь, отсутствие практически обоснованных и работоспособных алгоритмов. Возможности и преимущества применения этого подхода были рассмотрены в работах [6-8].

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации режимов ЭЭС с использованием итеративной процедуры получения линеаризованных выражений для целевой функции и ограничений, методов ЛП. Данный метод решения задачи называется методом аппроксимирующего программирования – МАП.

Решение задачи оптимизации ЭЭС по U и Q МАП на каждом шаге итерации включает следующие основные этапы: линеаризация УУР (2); линеаризация целевой функции (1); представление ограничений (3,4) в виде линейных выражений; приведение задачи ЛП к стандартной форме; решение задачи ЛП; выбор допустимого шага.

Ограничения в виде равенств представляют собой уравнения установившегося режима. Используя разложения УУР сложной электроэнергетической системы (2) в ряд Тейлора в окрестности планируемого режима Y_0 , получаем линеаризованные уравнения, которые справедливы при достаточно малом $\Delta Y = Y - Y_0$

$$\left[\frac{\partial W}{\partial X} \right] \Delta X = - \left[\frac{\partial W}{\partial Y} \right] \Delta Y, \quad S_{xy} = - \left[\frac{\partial W}{\partial X} \right]^{-1} \left[\frac{\partial W}{\partial Y} \right], \quad \Delta X = S_{xy} \Delta Y, \quad (5)$$

где $\partial W / \partial X$ – матрица производных небалансов мощностей по зависимым переменным, $\partial W / \partial Y$ – матрица производных небалансов мощностей по регулируемым переменным, $\Delta X = X - X_0$ – вектор поправок к зависимым переменным, S_{xy} – матрица чувствительности зависимых переменных при изменении регулируемых переменных.

Одним из возможных способов получения приближенных линеаризованных выражений является применение P - Q декомпозиции УУР. В результате линеаризации УУР при P - Q декомпозиции (5) представляются в виде.

$$\Delta X_1 = S_{x1y} \Delta Y, \quad \Delta X_2 = S_{x2y} \Delta Y, \\ S_{x1y} = - \left[\frac{\partial W_Q}{\partial X_1} \right]^{-1} \left[\frac{\partial W_Q}{\partial Y} \right], \quad S_{x2y} = - \left[\frac{\partial W_P}{\partial X_2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial W_P}{\partial Y} \right]. \quad (6)$$

Линеаризация целевой функции производится разложением суммарных потерь активной мощности в ряд Тейлора в окрестности планируемого режима

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial F}{\partial X} \Delta X. \quad (7)$$

УУР определяют неявную функции $X(Y)$, то есть неявную зависимость зависимых переменных от независимых.

Градиент неявной функции имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial Y} = \frac{\partial F}{\partial Y} \Big|_0 + \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial Y}. \quad (8)$$

где $\partial F/\partial X$, $(\partial F/\partial Y)_0$ – векторы частных производных целевой функции, полученные непосредственным дифференцированием выражения (1) по X и Y соответственно.

С учетом (5) выражение (8) представляется в виде

$$\frac{\partial F}{\partial Y} = \frac{\partial F}{\partial Y} \Big|_0 + \frac{\partial F}{\partial X} \left[\frac{\partial W}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial W}{\partial Y}. \quad (9)$$

Каждая итерация задачи оптимизации МАП с использованием (9) состоит из следующих этапов:

- формирование целевой функции в отклонениях от исходного

$$\Delta(\Delta P_{\text{сум}}) = c_U \cdot \Delta U + c_Q \cdot \Delta Q + c_{KT1} \cdot \Delta K_{Td} + c_{KT2} \cdot \Delta K_{Tq}; \quad (10)$$

где c_U , c_Q , c_{kt1} , c_{kt2} – коэффициенты линеаризованных выражений суммарных потерь.

- формирование ограничений на регулируемые параметры в отклонениях от исходного

$$\begin{aligned} \Delta U_{i \min} \leq \Delta U_i \leq \Delta U_{i \max}, \quad i \in \Gamma_{PU}; \\ \Delta Q_{i \min} \leq \Delta Q_i \leq \Delta Q_{i \max}, \quad i \in \Gamma_{PQ}; \\ \Delta K_{Tdl \min} \leq \Delta K_{Tdl} \leq \Delta K_{Tdl \max}, \quad l \in T; \\ \Delta K_{Tdq \min} \leq \Delta K_{Tdq} \leq \Delta K_{Tdq \max}, \quad l \in T; \end{aligned} \quad (11)$$

- формирование ограничений на зависимые параметры в отклонениях от исходного по (7)

$$\Delta U_{i \min} \leq a_U \cdot \Delta U + a_Q \cdot \Delta Q + a_{KT} \cdot \Delta K_T \leq \Delta U_{i \max}, \quad i \in \Gamma_{PQ} + H; \quad (12)$$

$$\Delta Q_{i \min} \leq a_U \cdot \Delta U + a_Q \cdot \Delta Q + a_{KT} \cdot \Delta K_T \leq \Delta Q_{i \max}, \quad i \in \Gamma_{PU}.$$

где $\Delta U_{i \min} = U_{i \min} - U_i$;

$\Delta U_{i \max} = U_{i \max} - U_i$;

$\Delta Q_{i \min} = Q_{i \min} - Q_i$;

$\Delta Q_{i \max} = Q_{i \max} - Q_i$;

$\Delta K_{Tdj \min} = K_{Tdj \min} - K_{Tdj}$;

$\Delta K_{Tdj \max} = K_{Tdj \max} - K_{Tdj}$;

$\Delta K_{Tqj \min} = K_{Tqj \min} - K_{Tqj}$;

$\Delta K_{Tqj \max} = K_{Tqj \max} - K_{Tqj}$.

Γ_{PU} – множество генераторных PU узлов; Γ_{PQ} – множество генераторных PQ узлов; H – множество нагрузочных и сетевых узлов; T – множество регулируемых трансформаторных ветвей продольного и поперечного регулирования.

Все задачи линейного программирования могут быть приведены к стандартной форме, в которой целевая функция должна быть минимизирована, а все ограничения должны быть заданы в виде равенств с неотрицательными переменными. Задача

оптимизации режимов ЭС МАП (10-12), приведенная к стандартной форме, имеет следующий вид.

Целевая функция (10) представляется в преобразованном виде.

Преобразование двусторонних ограничений (11) на регулируемые переменные с учетом допустимого значения шага.

$$\begin{aligned}
 \Delta U'_{imin} &= \max \{ \Delta U_{imin}, -\Delta U_{идоп} \}; & \Delta U'_{imax} &= \min \{ \Delta U_{imax}, \Delta U_{идоп} \}; \\
 \Delta Q'_{imin} &= \max \{ \Delta Q_{imin}, -\Delta Q_{идоп} \}; & \Delta Q'_{imax} &= \min \{ \Delta Q_{imax}, \Delta Q_{идоп} \}; \\
 \Delta K'_{tdjmin} &= \max \{ \Delta K_{tdjmin}, -\Delta K_{tdjдоп} \}; & \Delta K'_{tdjmax} &= \min \{ \Delta K_{tdjmax}, \Delta K_{tdjдоп} \}; \\
 \Delta K'_{tqjmin} &= \max \{ \Delta K_{tqjmin}, -\Delta K_{tqjдоп} \}; & \Delta K'_{tqjmax} &= \min \{ \Delta K_{tqjmax}, \Delta K_{tqjдоп} \}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 \leq \Delta U'_i \leq \Delta U''_{imax}, \quad i \in \Gamma_{PU}, \quad i \in \Gamma_{PU}; \\
 0 \leq \Delta Q'_i \leq \Delta Q''_{imax}, \quad i \in \Gamma_{PQ}; \\
 0 \leq \Delta K'_{Tl} \leq \Delta K''_{Tlmax}, \quad l \in T;
 \end{aligned} \tag{13}$$

где $\Delta U'_i = \Delta U - \Delta U'_{imin}; \quad \Delta U''_{imax} = \Delta U'_{imax} - \Delta U'_{imin};$
 $\Delta Q'_i = \Delta Q - \Delta Q'_{imin}; \quad \Delta Q''_{imax} = \Delta Q'_{imax} - \Delta Q'_{imin};$
 $\Delta K'_{Tl} = \Delta K_{Tl} - \Delta K'_{Tlmin}; \quad \Delta K''_{Tlmax} = \Delta K'_{Tlmax} - \Delta K'_{Tlmin}.$

Преобразование ограничений на зависимые переменные (12) с учетом допустимого значения шага на регулируемые переменные.

Задача (10-13) представляет собой стандартную задачу ЛП. Решая ее при помощи методов ЛП, находим новое приближение для регулируемых переменных. Для сходимости к оптимуму достаточно, чтобы для последовательности векторов регулируемых переменных, полученных в результате решения последовательности подзадач ЛП, выполнялось следующее условие: значения целевой функции и невязки по ограничениям в $k+1$ итерации меньше их значений в k -ой итерации.

Оптимизация режима ЭЭС по U, Q и K_T методом последовательной линеаризации сводится к следующему: производится расчет установившегося режима ЭС для начального приближения; производится линеаризация УУР и целевой функции, формируется и решается задача линейного программирования в отклонениях; определяется следующее приближение и производится переход от отклонений к абсолютным значениям переменных; итеративное повторение процесса оптимизации МАП продолжается до достижения наперед заданной точности по разнице значений целевой функции в последних двух итерациях. Решение задачи линейного программирования осуществляется модифицированным симплекс-методом.

Линеаризованные выражения (10) являются приближенными, так как действительная зависимость ΔP отличается от линейной, особенно при больших нагрузках сети и фазовых углах. С целью экспериментального анализа погрешностей линеаризации и обоснования выбора границ линеаризации был проведен анализ чувствительности целевой функции и зависимых переменных по результатам линеаризации по полным (5) и разделенным (6) уравнениям установившегося режима на примерах ЭС (табл.1.): 6-и узловой 110-220 кВ, 20-и узловой 500-1150 кВ (рис.1), и эквивалентной 96-и узловой схемы Азерэнерджи, включающей напряжения 110-500 кВ.

Таблица 1.

| № задачи | Напряжения, кВ | Количество | | Число регулируемых переменных | | | |
|----------|----------------|------------|--------|-------------------------------|------|------|----------|
| | | узлов | ветвей | общее | по U | по Q | По K_T |
| 1 | 110-220 | 6 | 7 | 6 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 500-1150 | 20 | 20 | 9 | 2 | 5 | 2 |
| 3 | 110-500 | 96 | 127 | 39 | 6 | 13 | 17 |

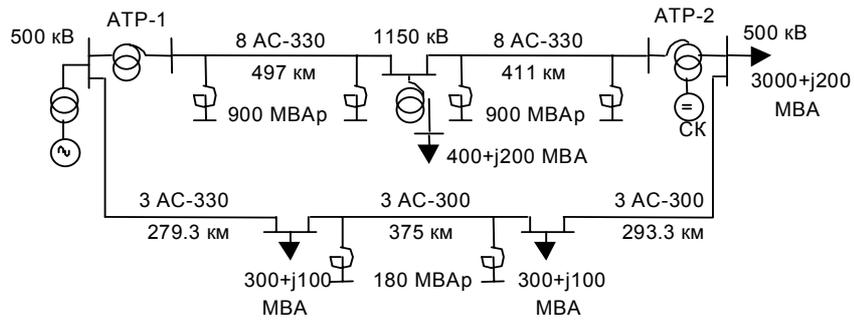


Рис. 1. Тестовая схема 500-1150 кВ для исследования оптимизации режима ЭС по U , Q и K_T методом последовательной линеаризации.

Из линеаризованных выражений следует, что чувствительность суммарных потерь активной мощности для задачи 1 по разделенным выражениям имеет большие погрешности. К примеру, по ΔK_{T65} погрешность составляет более, чем 350%. Матрицы чувствительности целевой функции, полученные для задачи 2 и для задачи 3 по упрощенным выражениям, основанным на **P-Q** декомпозиции, содержат значительные погрешности, отличающиеся более, чем на один порядок, а по отдельным переменным коэффициенты имеют противоположные знаки. Таким образом, использование упрощенных выражений для линеаризации целевой функции на основе **P-Q** декомпозиции приводит к большим погрешностям и неадекватности линеаризованной модели для загруженных схем и схем с большими фазовыми углами. Поэтому использование линеаризованных выражений, полученных на основе **P-Q** декомпозиции, неприемлемо для таких схем и требует в каждом конкретном случае обоснования.

Сопоставление полных линеаризованных выражений производилось с результатами расчетов суммарных потерь мощности, полученных в результате проведения расчетов установившегося режима. Анализ режимов ЭС показывает, что линейная зависимость активных потерь от напряжения и коэффициента трансформации сохраняется при небольших отклонениях, а от реактивной мощности-при относительно больших отклонениях от исходного значения.

Линеаризация не гарантирует в общем случае сходимости алгоритма к оптимуму. Она дает хорошее приближение в достаточно малой окрестности базовой точки, но это приближение становится плохим на большом расстоянии от этой точки, особенно, в случае сильной нелинейности рассматриваемой функции в окрестности базовой точки. Налагая ограничения на возможные изменения переменных, можно добиться использования линейного приближения в окрестности базовой точки. Исходя из этих ограничений, величину шага поправки следует выбирать таким образом, чтобы значения целевой функции исходной задачи уменьшались, а невязки по ограничениям сокращались на каждой итерации. Выполнение этих требований гарантирует сходимость алгоритма [7,8].

В большинстве случаев оптимальные и допустимые значения регулируемых переменных в зависимости от вида оборудования и допустимости режима находятся в интервалах: $U = (0.9 \div 1.1)U_{ном}$, $K = (0.88 \div 1.12)K_{ном}$. Пределы изменения шага по реактивной мощности в зависимости от типа источника, располагаемой реактивной мощности и принципов управления может меняться в широких пределах $(0.1-0.5)Q_{пр}$.

При оптимизации режимов ЭС МАП величина шага для нормально сходящегося итерационного процесса по мере приближения к оптимуму уменьшается. Сходимость МАП зависит от степени нелинейности. Для умеренно нелинейных задач сходимость монотонная. При наличии “сильных” нелинейностей для обеспечения сходимости приходится выбирать малый шаг, поэтому сходимость становится более медленной.

Для ограничения чрезмерного увеличения величины шага при монотонной сходимости и при вводе ускоряющих коэффициентов максимальная величина шага берется из условия $\mathbf{h}_{k+1} \leq \mathbf{h}_{\max}$. С другой стороны, в практических расчетах слишком большое уменьшение шага не имеет смысла, во-первых, с точки зрения точности моделирования режимов ЭС и, во-вторых, с точки зрения точности реализации управляющих воздействий по регулируемым параметрам. Поэтому для предотвращения чрезмерного уменьшения величины шага вводятся ограничения на наименьшие значения шага по переменным $\mathbf{h}_{k+1} \geq \mathbf{h}_{\min}$.

В данной работе предлагается следующая методика выбора шага МАП: задание начального максимального шага и уменьшение шага по отдельным регулируемым переменным после числа итераций ($N_{\text{ит}}=3\div 5$) по формуле $\mathbf{h}_{\max} = \gamma * \mathbf{h}_{\text{нач}}$, где $\gamma = 0.7$; проверка знака градиента и ввод коэффициента ускорения или замедления при соблюдении следующих условий:

если $(\nabla F_k, \nabla F_{k+1}) > 0$, то $\mathbf{h}_{k+1} = \alpha_{\text{уск}} \mathbf{h}_k$,

если $(\nabla F_k, \nabla F_{k+1}) < 0$, то $\mathbf{h}_{k+1} = \alpha_{\text{зам}} \mathbf{h}_k$, (14)

где – $\alpha_{\text{уск}} > 1$ и $\alpha_{\text{зам}} < 1$, $\alpha_{\text{уск}}$ и $\alpha_{\text{зам}}$ -соответственно коэффициенты ускорения и замедления;

- учет ограничений на величину шага

если $\mathbf{h}_{k+1} > \mathbf{h}_{\max}$, то $\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_{\max}$; если $\mathbf{h}_{k+1} < \mathbf{h}_{\min}$, то $\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_{\min}$. (15)

В [3] при оптимизации режима градиентным методом был использован алгоритм (14) выбора величины шага по регулируемым переменным. Аналитическое определение значений шага \mathbf{h}_{\min} и \mathbf{h}_{\max} не представляется возможным. Поэтому в данной работе выбран подход их экспериментального определения на основе анализа результатов оптимизационных расчетов на тестовых примерах.

С целью анализа влияния величины шага на сходимость итерационного процесса оптимизации МАП вблизи оптимума были произведены расчеты при ограничении величины шага путем ввода коэффициента замедления $\alpha_{\text{зам}} = 1$ по алгоритму (14) отдельно для каждой регулируемой переменной.

Зависимости, характеризующие количество итераций и точность достижения оптимума для схемы 500-1150 кВ, в зависимости от \mathbf{h}_{\max} , \mathbf{h}_{\min} и параметра γ , позволяющего регулировать величину поправки при решении последовательности задач линеаризации по формуле $\mathbf{h}_{\min} = \gamma * \mathbf{h}_{\max}$, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

| N | Условия проведения Расчета | Значение параметра γ | Количество итераций | Суммарные потери, МВт |
|---|--|-----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | $\Delta U_{500} = 5$ кВ $\Delta K_{r1150} = 0.023$ $\Delta Q_{500} = 50$ МВАр $\Delta Q_{1150} = 200$ МВАр $\alpha_{\text{зам}} = 0.4$ точность 0.0005 | 0.01 | 7 | 309.41 |
| | | 0.05 | 8 | 309.24 |
| | | 0.10 | 19 | 307.16 |
| | | 0.15 | 19 | 307.16 |
| | | 0.20 | 15 | 307.15 |
| | | 0.30 | 8 | 309.24 |
| 2 | $\Delta U_{500} = 7.5$ кВ $\Delta K_{r1150} = 0.069$ $\Delta Q_{500} = 100$ МВАр $\Delta Q_{1150} = 300$ МВАр $\alpha_{\text{зам}} = 0.4$ точность 0.0005 | 0.001 | 6 | 306.45 |
| | | 0.01 | 6 | 306.35 |
| | | 0.05 | 6 | 306.34 |
| | | 0.10 | 6 | 306.33 |
| | | 0.15 | 6 | 306.33 |
| | | 0.20 | 6 | 306.41 |

Примечание. В таблице 2 h_{\max} принят равным ΔU , ΔK_T и ΔQ соответственно по каждой переменной.

Результаты анализа показывают, что при задании малой величины шага происходит преждевременный выход из итерационного процесса оптимизации, не достигая действительного оптимума. К примеру, в таблице 2 при $h_{\min} = 0.01 \cdot h_{\max}$ решение получается за 7 итераций при $\Delta P_{\Sigma} = 309.41$ МВт, когда действительным оптимальным является решение при $\Delta P_{\Sigma} = 306.41$ МВт. Аналогичная ситуация возникает также при задании больших величин шага. К примеру, в таблице 2 при $h_{\min} = 0.3$ решение получается за 8 итераций при $\Delta P_{\Sigma} = 309.24$ МВт, когда действительным оптимальным является решение при $\Delta P_{\Sigma} = 306.41$ МВт. Расчеты, проведенные с учетом (14,15) при $\alpha_{\text{зам}} = 0.4$, позволяют получить оптимальное решение.

Были произведены аналогичные расчеты также для эквивалентной 96-и узловой схемы (N3). Для схем, приведенных в табл. 1., количество итераций оптимизации МАП с учетом (14, 15) и $\alpha_{\text{зам}} = 0.4$ составляло 8-11 итераций.

В математической литературе обычно рекомендуется принимать значения ускоряющих и замедляющих коэффициентов (14) $\alpha_{\text{уск}} = 2.0$ и $\alpha_{\text{зам}} = 0.5$. Расчеты, произведенные при таких значениях множителей изменения шага МАП для выше-приведенных примеров электрических схем, показывают, что при этом наблюдается расходящийся итерационный процесс, или замедление процесса. Экспериментальные исследования, проведенные для задач оптимизации электрических сетей градиентным методом во ВНИИЭ [3], показали, что результаты, близкие к оптимальным, дают значения $\alpha_{\text{уск}} = 1.3$ и $\alpha_{\text{зам}} = 0.4$. Проведенные авторами исследования показывают, что данные значения коэффициентов являются оптимальными и при применении МАП.

Для выбора шага МАП на основе анализа полученных результатов в работе предлагается нижеследующий алгоритм: - задание начальных значений, равных максимальным шагам по отдельным регулируемым переменным и уменьшение их величин после 3 итераций по формуле $h_{\max} = 0.7 \cdot h_{\text{нач}}$; - проверка знака градиента по (14,15) и ввод коэффициента замедления или ускорения соответственно ($\alpha_{\text{уск}} = 1.3, \alpha_{\text{зам}} = 0.4$).

Начальные шаги по U , K_T и Q в зависимости от класса напряжения электрической сети рекомендуется принимать в пределах, приведенных в таблице 3.

Таблица 3.

| Класс напряжения, кВ | Величина начального шага в % по | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----------|---------|
| | U | K_T | Q |
| 6-35 | 2.0 – 4.0 | 2.0 – 4.0 | 20 – 30 |
| 110-330 | 1.5 – 2.5 | 2.0 – 4.0 | 15 – 25 |
| 500-1150 | 0.5 – 1.5 | 1.0 – 3.0 | 10 – 30 |

Рекомендуются следующие значения минимального шага: $\Delta U_{\min} \geq (0.001-0.005)U_{\text{ном}}$; $\Delta K_{T\min} \geq (0.001-0.005)K_T$; $\Delta Q_{\min} \geq (0.01-0.05)Q_{\text{пр}}$. Здесь $Q_{\text{пр}}$ - максимально располагаемая реактивная мощность источника.

Проанализированы характеристики сходимости процесса оптимизации по разработанной программе с применением МАП с относительной точностью 0.0005. В зависимости от размерности решаемой задачи, количества регулируемых переменных и режима работы ЭС МАП обеспечивает решение за 5-15 итераций.

На рис.2 приведены кривые, характеризующие сходимость итерационного процесса оптимизации МАП для задачи 5. На рис.3 приведены кривые, характеризующие изменение

длины шага МАП от номера итерации процесса оптимизации МАП для задачи 5.

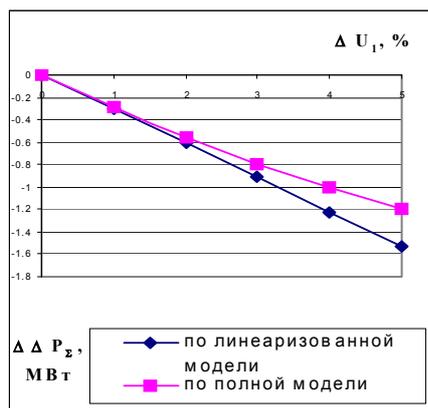


Рис.2. Погрешность суммарных потерь линеаризованной модели для 6-и узловой задачи 110-220 кВ в зависимости от отклонения напряжения узла 1.

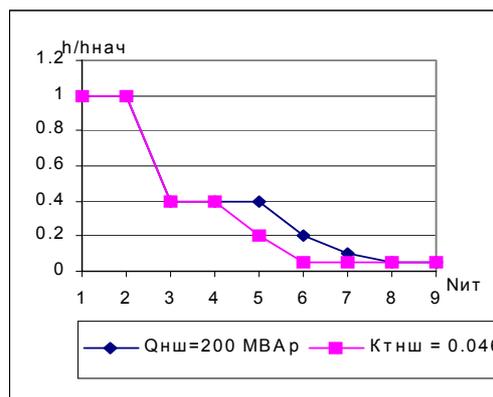


Рис.5. Относительное изменение длины шага от номера итерации задачи N2 МАП.

Анализ изменения длины шага показывает, что с приближением к оптимуму длина шага уменьшается и в конце процесса ее значение достигает минимального значения.

На основе изложенных алгоритмов линеаризации целевой функции и УУР разработана программа в среде DELPHI, включающая модули: расчет установившихся режимов электрических сетей модифицированным быстродействующим методом Ньютона с разделением; вычисления матрицы чувствительности и линеаризации целевой функции и ограничений; выбор шага оптимизации с применением ускоряющих и замедляющих коэффициентов; составление задачи линейного программирования в отклонениях; решение задачи линейного программирования модифицированным симплекс-методом. Разработана база данных для моделирования режимов ЭС в системе программирования DELPHI4 в среде WINDOWS.

Применение для оптимизации режимов ЭС по U , Q и K_t , линеаризованной модели ЭС, анализа чувствительности и методов линейного программирования на основе разработанной программы и анализ результатов расчета показывают, что оптимизация режимов ЭС с использованием МАП представляется перспективной.

1. Крумм Л.А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. - Новосибирск: Наука, 1977. - 368 с.
2. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем /Н.А.Мурашко, Ю.А.Охорзин, Л.А.Крумм и др. - Новосибирск: Наука, 1987. - 239 с.
3. Методы оптимизации режимов энергосистем /В.М.Горштейн, Б.П.Мирошниченко, А.В.Пономарев и др. - М.: Энергия, 1981.- 366 с.
4. Баламетов А.Б., Мусаханова Г.С., Халилов Э. Д. Оптимизация режима работы электрических сетей по напряжению и реактивной мощности с учетом фактора на дежности. В кн.: Вопросы обеспечения экономичности и надежности работы энергетических систем: Сб. научн. тр. /АзНИИ энергетики им. И.Г.Есьмана. -Баку - 1992.-С. 107-116.
5. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Оптимизация режимов электроэнергетических систем по напряжению и реактивной мощности методом аппроксимирующего программирования. Труды II Международного симпозиума "Проблемы математического моделирования, управления и информационных технологий в нефтегазовой промышленности". Баку, 1998 г., стр. 158-161.

6. *Халилов Э.Д.* Оптимизация режимов электрических сетей по напряжению и реактивной мощности методом линейного аппроксимирующего программирования. Автореф. дис... канд. техн. наук. Баку 2000.-25 с.
7. *Пшеничный Б.Н., Данилин Ю.М.* Численные методы в экстремальных задачах. – Наука, 1975, 320 с.
8. *Г.Реклейтис, А. Рейвиндран, К.Рэгсдел.* Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн.1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986.-349 с.

**ARDICIL XƏTTİLƏŞDİRMƏ ÜSULU İLƏ ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİ
REJİMLƏRİNİN GƏRGİNLİYƏ VƏ REAKTİV GÜCƏ GÖRƏ
OPTİMALLAŞDIRILMASI HAQQINDA**

BALAMETOV A.B., MUSAXANOVA Q.S., XƏLİLOV E.D.

Elektrik şəbəkəsinin ümumi aktiv güc itkisi şəklində məqsəd funksiyasının və asılı dəyişənlərin ardıcıl xəttləşdirilməsi və xətti proqramlaşdırma metodu əsasında elektrik şəbəkəsi rejiminin optimallaşdırılması məsələsinin həllinin alqoritmi təklif olunur. Ardıcıl xətti proqramlaşdırma üsulu ilə optimallaşdırma məsələsinin həlli və addımın seçilməsi üçün metodika və alqoritmlər təklif olunur. Alqoritmlər elektrik şəbəkələrinin 6, 20 və 96 düyünlük test məsələləri üzərində sınaqdan keçirilmişdir.

**ABOUT OF THE ELECTRICAL NETWORKS MODES OPTIMIZATION ON
VOLTAGE AND REACTIVE POWER BY THE METHOD OF
SEQUENTIAL LINEARIZATION**

BALAMETOV A.B., MUSAKHANOVA G.S., XALILOV E.D.

The algorithms of the problem solution of the electrical networks modes optimization on voltage and reactive power using sequential linearization of efficiency function as total losses of active power and the dependent variables limits in form electrical network steady-state equations and linear programming methods are offered. and using for problem solving the linear programming method. A technique and algorithms of the optimization problem solving by the method of approximating programming and step choice are offered. The capacity for work of the algorithms was checked on 6, 20 and 96 buses examples of electrical networks.