

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
"КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

Специализированный Совет К 01.02.19

На правах рукописи

Омар Юсеф Мохамед РАДАЙДА
(Иордания)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ УЗЛОВ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – "Электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени
кандидата технических наук

КИЕВ • 1997



Работа выполнена на кафедре электрических станций Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт".

Научный руководитель – Доктор технических наук,
профессор КОСТЕРЕВ Н.В.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
старший научный сотрудник
АВРАМЕНКО В.Н.

Кандидат технических наук,
доцент МЕЛЬНИК В.П.

Ведущая организация – Киевский филиал научно-исследовательского и проектно-изыскательного института "Энергосетьпроект"

Защита диссертации состоится "19" мая 1997 г. в 15⁰⁰ на заседании специализированного Совета К 01.02.19 в Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт" (корпус № 20, ауд. 3).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 252056, г. Киев-56, пр. Победы, 37, НТУУ "КПИ", Ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального технического университета Украины "КПИ".

Автореферат разослан "14" 04 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., профессор

Б.Н. Кондра

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных задач при оперативном управлении энергосистемой и при планировании режима является обеспечение достаточного запаса статической устойчивости параллельной работы электростанций и узлов нагрузки. Нарушение их устойчивости вызывает обесточивание большой группы электроприемников, повреждение оборудования и др.

До последнего времени в задаче исследования статической устойчивости энергосистем основной акцент делался на исследование устойчивости генераторов. При этом нагрузка моделировалась настолько упрощенно, что оценить ее собственную устойчивость и влияние на устойчивость энергосистемы не представлялось возможным или устойчивость нагрузки рассматривалась в предположении, что она питается от системы большой мощности.

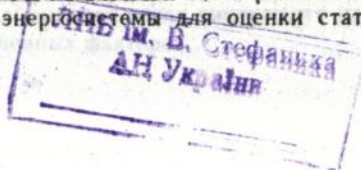
Вместе с тем, как свидетельствует опыт эксплуатации, в энергосистемах возникают нарушения статической устойчивости, обусловленные неустойчивостью узлов нагрузки. Основным фактором, определяющим статическую неустойчивость нагрузки по напряжению, является наличие в составе комплексной нагрузки асинхронных и синхронных двигателей, что в определенных условиях может привести к лавине напряжения. Такая неустойчивость проявляется, в первую очередь, в прогрессирующем снижении (до 30-60% нормального напряжения). Кроме того, если мощность, потребляемая в узле нагрузки, соизмерима с мощностью ближайших генераторов, то неустойчивость нагрузки может привести к нарушению устойчивости параллельной работы генераторов.

Различные аспекты устойчивости по напряжению узлов нагрузки рассматривались в работах Авраменко В.Н., Веникова В.А., Гуревича Ю.Е., Жданова П.С., Либовой Л.Е., Горбуновой Л.М., Сыромятникова И.А., Сивокобыленко В.Ф., Dobson J., Chiang H., Thomas R., Gao B., Liu J., Pal M., Cheng S., Barbier C. и других.

Однако сложность данной многоплановой научной и технической проблемы требует дальнейшего развития методов моделирования узлов нагрузки для принятия обоснованных решений при управлении энергосистемой.

Существующие подходы к оценке статической устойчивости по напряжению узлов нагрузки позволяют, в основном, определять слабые по устойчивости узлы нагрузки. Для более эффективного управления ЭЭС необходимо комплексное решение проблемы, которое включает определение слабых с точки зрения устойчивости по напряжению узлов нагрузки; уточнение устойчивости узлов нагрузки на основе динамических моделей нагрузки; определение элементов нагрузки, которые являются первопричиной неустойчивости нагрузки.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в развитии методов моделирования энергосистем для оценки статической



устойчивости комплексного узла нагрузки и ее элементов. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Построение формализованной математической модели энергосистемы в форме переменных состояния как совокупности взаимосвязанных подсистем динамических элементов и подсистемы связи.

2. Разработка математических моделей асинхронных, синхронных двигателей и статической нагрузки в единообразной форме переменных состояния и алгоритма определения устойчивости узла и элементов нагрузки.

3. Разработка практического критерия и алгоритма оценки устойчивости узлов нагрузки простых радиальных схем.

4. Разработка метода и алгоритма построения модели АРВ синхронных двигателей в форме переменных состояния на основе передаточных звеньев.

5. Реализация программного обеспечения на основе предложенных методов и алгоритмов, предназначенных для комплексного решения задачи оценки устойчивости узлов нагрузки.

Методы исследования. В основу исследований положены теория устойчивости электроэнергетических систем, методы моделирования энергосистем и современные достижения компьютерных технологий. Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением математических методов к решаемым задачам, выполнением вычислительных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный подход к оценке устойчивости по напряжению узлов нагрузки энергосистемы.

2. Математические модели асинхронных, синхронных двигателей и статической нагрузки в форме переменных состояния, и алгоритм определения их устойчивости.

3. Практический критерий и алгоритм оценки устойчивости узлов нагрузки радиальных схем.

4. Метод и алгоритм построения модели АРВ синхронного двигателя в форме переменных состояния на основе передаточных звеньев.

Научная новизна.

1. Комплексный подход оценки статической устойчивости по напряжению узла нагрузки и его элементов.

2. Математические модели элементов и узла нагрузки в единообразной форме переменных состояния, использование которых позволило создать эффективные алгоритмы оценки устойчивости как всего узла нагрузки, так и отдельных элементов на основе матричной экспоненты.

3. Практический критерий и алгоритм оценки устойчивости узла нагрузки радиальных схем, на основе которого предложен алгоритм действия автоматики отключения части нагрузки для сохранения ее устойчивости.

4. Метод и алгоритм формирования математической модели АРВ синхронных машин в форме переменных состояния на основе структурной схемы, представленной передаточными звеньями. Отличительной чертой такого подхода является то, что повышается гибкость моделирования АРВ и возможность использования в качестве переменных состояния физически реализуемых переменных.

Практическая ценность работы. На основе разработанных методов и алгоритмов реализованы программные модули для оценки слабых по устойчивости узлов нагрузки и отдельных ее элементов, позволяющие при эксплуатации и планировании режима ЭЭС принимать обоснованные решения при управлении энергосистемой. Предложенный практический критерий оценки устойчивости дает возможность реализации автоматики отключения части нагрузки для сохранения ее устойчивости. Созданная программа построения модели АРВ синхронных двигателей дает возможность пользователю формировать различные модели АРВ.

Реализация работы. Приведенные в диссертации результаты являются составной частью выполняемых на кафедре электрических станций Национального технического университета Украины "КПИ" научно-исследовательской работы "Разработка интегрированных экспертных систем для управления режимом ЭЭС". Основные положения и результаты научных исследований используются в учебном процессе при чтении курса "Переходные процессы в электрических системах", а также рекомендованы Управлением гражданской авиации Иордании для создания специализированной программы управления системой электроснабжения аэропорта.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научном семинаре кафедры электрических станций НТУУ "КПИ".

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 87 наименований, изложенных на 138 страницах и включающих 25 иллюстраций, и приложения на 57 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель и задачи диссертации, отражены ее научная новизна и практическая ценность, положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о структуре работы.

В первой главе приведена характеристика современного состояния проблемы. Изложены общие сведения об анализе статической устойчивости по напряжению электроэнергетических систем и узлов нагрузки на основе практических критериев.

Нарушение статической устойчивости узла нагрузки возникают вследствие действия следующих основных факторов:

- снижения напряжения в узле энергосистемы в результате роста нагрузки в условиях отсутствия запасов по реактивной мощности в системе или при внезапном отключении генерирующих мощностей и дальнейшей разгрузке дежурным персоналом перегружившихся генераторов;

- резкого увеличения внешнего сопротивления по отношению к узлу нагрузки в результате отключения части питающих линий;

- значительного увеличения мощности, отдаваемой приводному механизму.

Определение условий устойчивости нагрузки энергосистемы является одним из необходимых этапов общего анализа устойчивости, который выполняется при выборе структуры энергосистемы, определении пропускной способности линии электропередач, выборе средств управления, защиты и противоаварийной автоматики в энергосистемах. Такие исследования выполняются, главным образом, для уточнения области допустимых режимов, параметров устройств регулирования, защиты и автоматики. Расчеты устойчивости нагрузки необходимы также и при проектировании промышленных предприятий с целью разработки мероприятий, обеспечивающих непрерывность технологических процессов в различных режимах работы энергосистемы. Особенностью таких расчетов является необходимость учета крупных узлов нагрузки, (от нескольких мегаватт (отдельные цеха и т.д.) до сотен и тысяч мегаватт (районы с разнообразной нагрузкой при анализе устойчивости энергосистем).

Как показывает опыт эксплуатации, в энергосистемах неоднократно наблюдалось нарушение статической устойчивости энергосистем вследствие нарушения устойчивости узлов нагрузки по напряжению — возникновение лавины напряжения. Такие режимы наблюдались во Франции, Бельгии.

Возникновению неустойчивости нагрузки по напряжению способствует то, что в энергосистемах достаточно часто возникают провалы напряжения.

Приведенные в литературе измерения на шинах среднего напряжения зафиксировали около 200 провалов напряжения в год в городских районах и более 300 — в сельских районах, причем отмечалось снижение напряжения на 10÷20% (45% от общего числа) до 60÷70% нормального напряжения (1.3%).

Основными элементами, которые определяют устойчивость узла комплексной нагрузки, являются асинхронные и синхронные двигатели. В работе дана характеристика двигателей при снижении напряжения.

Важность учета нагрузки при анализе устойчивости энергосистем подчеркивал еще Жданов П.С., который отмечал, что во многих случаях нельзя отделить вопрос об устойчивости генераторов от устойчивости асинхронных двигателей.

В дальнейшем в работах Совалова С.А., Марковича И.М. был предложен и обоснован практический критерий оценки статической устойчивости dQ/dU , который для многоузловых энергосистем дает возможность (при

отсутствии самораскачивания) с приемлемой точностью определить слабые узлы с точки зрения устойчивости по напряжению.

Большое число исследований посвящено устойчивости отдельных асинхронных и синхронных двигателей, комплексного узла нагрузки как самостоятельной задачи. При этом, по сути, энергосистема по отношению к узлу нагрузки представляется в виде источника бесконечной мощности, что не позволяет анализировать влияние нагрузки на устойчивость энергосистемы в целом.

В последние годы появилось большое число исследований, посвященных устойчивости узлов системы по напряжению, особенно в зарубежных энергокомпаниях, где для оценки устойчивости узлов системы по напряжению используется матрица Якоби

$$\Delta Q = J_R \Delta V,$$

При увеличении нагрузки по мере подхода к границе устойчивости, критические собственные значения Якобиана непрерывно уменьшаются, одно из них стремится к нулю в критическом узле нагрузки, что и считается признаком неустойчивости системы по напряжению. В результате вычисления собственных значений Якобиана рекомендуется выделить около 10 "слабых" узлов, которым соответствуют минимальные значения собственных чисел.

Следует отметить, что в этих работах нагрузка представляется постоянным сопротивлением или статической характеристикой, что не обеспечивает уверенности в правильном определении слабых узлов.

Методы, основанные на статических моделях, позволяют достаточно быстро оценить множество слабых узлов энергосистемы и проранжировать их. Вместе с тем, имеется значительный риск получения неверных результатов, так как нагрузка в этих моделях представлена либо постоянным сопротивлением, либо статическими характеристиками. Данные модели не позволяют определить устойчивость самой нагрузки при постоянстве напряжения на шинах нагрузки, так как для решения этой задачи требуется динамическая линеаризованная модель. Если установлена неустойчивость узла комплексной нагрузки, то статические модели не позволяют определить элемент нагрузки, который является первопричиной нарушения устойчивости.

На основе вычислительных экспериментов, проведенных по программе КОМПАС, было показано, что проблема устойчивости узлов нагрузки для энергосистемы Иордании является важной в силу таких факторов, как наличие дизельных электростанций, загруженных линий электропередач, большой концентрации двигательной нагрузки в отдельных узлах энергосистемы.

Вторая глава посвящена разработке математической модели сети и динамических элементов ЭЭС.

2

Третья глава посвящена разработке алгоритма определения слабых узлов нагрузки ЭЭС. Рассмотренные энергосистемы содержат сотни и тысячи узлов нагрузки, в связи с чем анализ устойчивости

Пусть энергосистема содержит k генерирующих источников ($k \in (1, j)$) и l узлов нагрузки ($l \in (j+1, n)$), объединенных при помощи подсистемы связи (рис. 1):



Рис. 1.

Состояние каждой отдельной подсистемы описывается алгебро-дифференциальными уравнениями в форме переменных состояния:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i U_i,$$

$$Y_i = C_i x_i + D_i U_i,$$

где: x_i — вектор-столбец переменных состояния динамических элементов, входящих в подсистему S_i ; U_i — вектор-столбец входных сигналов, который в соответствии с физической сущностью задачи соответствует приращению напряжения в узле энергосистемы; Y_i — вектор-столбец выходных сигналов подсистемы, который соответствует приращению реактивной или активной мощности узла энергосистемы; A_i, B_i, C_i, D_i — постоянные матрицы соответствующих размерностей.

Отдельные подсистемы объединяются во взаимосвязанную систему при помощи подсистемы связи ПС, состояние которой описывается алгебраическими уравнениями, связывающими приращения реактивной мощности и приращения напряжений в узлах ЭЭС: $Y = IU$,

где $Y^T = [y_1 \dots y_n]$; $U = [U_1 \dots U_n]$.

Линеаризованная модель подсистемы связи, полученная на основе уравнений стационарного режима, представлена в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{P\theta} & I_{PU} \\ I_{Q\theta} & I_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix}.$$

При неучете изменения активной мощности имеем:

$$\Delta Q = (I_{QU} - I_{Q\theta} \cdot I_{P\theta}^{-1} \cdot I_{PU}) \cdot \Delta U.$$

Математические модели элементов нагрузки в форме переменных состояния получены в следующем виде:

1) Асинхронный двигатель:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta e'_d \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_d} & -s_0 & -e'_{d0} \\ s_0 & -\frac{1}{T'_d} & -e'_{q0} \\ \frac{U_{d0}}{T_j x'_s} & -\frac{U_{q0}}{T_j x'_s} & \frac{2K(1+s_0)}{T_j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta e'_d \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N}{T_d x'_s} & \\ & \frac{N}{T_d x'_s} \\ -\frac{e'_{d0}}{T_j x'_s} & \frac{e'_{q0}}{T_j x'_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_q \\ \Delta U_d \end{bmatrix}$$

$$\Delta Q_s = \begin{bmatrix} -\frac{U_{q0}}{x'_s} & -\frac{U_{d0}}{x'_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta e'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ x'_s (2U_{q0} - e'_{q0}) \end{bmatrix} \frac{1}{x'_s} (2U_{q0} - e'_{q0}) \times \begin{bmatrix} \Delta U_q \\ \Delta U_d \end{bmatrix}$$

2) Синхронный двигатель:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial e'_q} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \\ & & \frac{\partial f_2}{\partial s} \\ \frac{\partial f_3}{\partial e'_q} & \frac{\partial f_3}{\partial \delta} & \frac{\partial f_3}{\partial s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial U} \\ \\ \frac{\partial f_3}{\partial U} \end{bmatrix} \times \Delta U$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial e'_q} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta e'_q \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \times \Delta U$$

3) Статическая нагрузка:

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} -\frac{1}{x_c} U'_0 & -\frac{1}{x_c} U''_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta E' \\ \Delta E'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{x_c} (2U'_0 - E'_0) & \frac{1}{x_c} (2U''_0 - E''_0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U' \\ \Delta U'' \end{bmatrix}$$

Таким образом, для комплексного узла нагрузки, содержащего эквивалентный асинхронный двигатель, эквивалентный синхронный двигатель и статическую нагрузку, построена математическая модель в форме переменных состояния, позволяющая определить приращение реактивной мощности

$$\Delta Q_n = \Delta Q_{a.d.} + \Delta Q_{c.d.} + \Delta Q_{c.t.}$$

в зависимости от изменения напряжения, что дает возможность выполнить оценку устойчивости (неустойчивости) узла нагрузки по напряжению.

Третья глава посвящена разработке методов и алгоритмов оценки устойчивости узлов нагрузки ЭЭС. Современные энергосистемы содержат сотни и тысячи узлов нагрузки, в связи с чем оценка устойчивости

всех узлов нагрузки на основе динамических моделей представляет собой весьма трудоемкую задачу. Поэтому целесообразно вначале определить "слабые" по устойчивости узлы нагрузки, используя статические модели нагрузки и затем уточнить устойчивость, используя динамические модели. Определение "слабых" узлов нагрузки в первом приближении можно осуществить по известным методам и программам или использовать следующий подход. Задавая в i -ом узле приращение ΔQ_i , а в остальных узлах $\Delta Q_j = 0$, находим из

$$\Delta U = (I_{Q_i} - I_{Q_i} \cdot I_{T_i}^{-1} \cdot I_{P_i})^{-1} \cdot \Delta Q_i = B \cdot \Delta Q_i$$

приращения напряжений в узлах энергосистемы: уточняем изменение $\Delta Q_j = f(\Delta U_j)$ во всех узлах, кроме i -го, и вновь находим ΔU_i . После ряда итераций определяем $\Delta Q_i / \Delta U_i$, что дает возможность определить индекс устойчивости узла нагрузки:

$$V C_i = \frac{\Delta Q_i}{\Delta U_i} - \frac{\Delta Q_{\text{ин}}}{\Delta U_i}$$

Определив индекс устойчивости для каждого узла, производим их ранжировку и из множества m узлов выбирается подмножество r наиболее "слабых" узлов нагрузки.

Для уточнения оценки устойчивости на основе динамической модели предложен алгоритм (рис. 2), который использует известные критерии устойчивости, разработанные проф. Костеревым Н.В. и базирующиеся на свойствах матричной экспоненты.

На базе данного алгоритма разработан программный модуль, который позволяет выполнить быструю оценку устойчивости асинхронных и синхронных двигателей, присоединенных к одному узлу нагрузки. Если обнаружено нарушение устойчивости всего узла нагрузки, то, используя данный программный модуль, возможно установить, какие двигатели явились первопричиной нарушения устойчивости узла нагрузки, т.е., какие двигатели и в какой последовательности первыми нарушили устойчивость, что привело к дальнейшему снижению напряжения на шинах и, в конечном итоге, нарушению устойчивости всего узла нагрузки.

В работе приведена оценка устойчивости (неустойчивости) асинхронного двигателя, имеющего следующие параметры:

$$x_s = 4.2409, x_f = 4.4907, T_d = 230.29 \text{ рад}, T'_d = 22.03 \text{ рад},$$

$$x'_s = 0.4057, N = 3.8352.$$

Первый режим характеризовался параметрами:

$$U = 0.9, P_k = -0.847, Q_k = -0.7814, s = -0.03163$$

Последовательное возведение матрицы H в k -ю степень ($k=512$) дало результат (9 произведений):

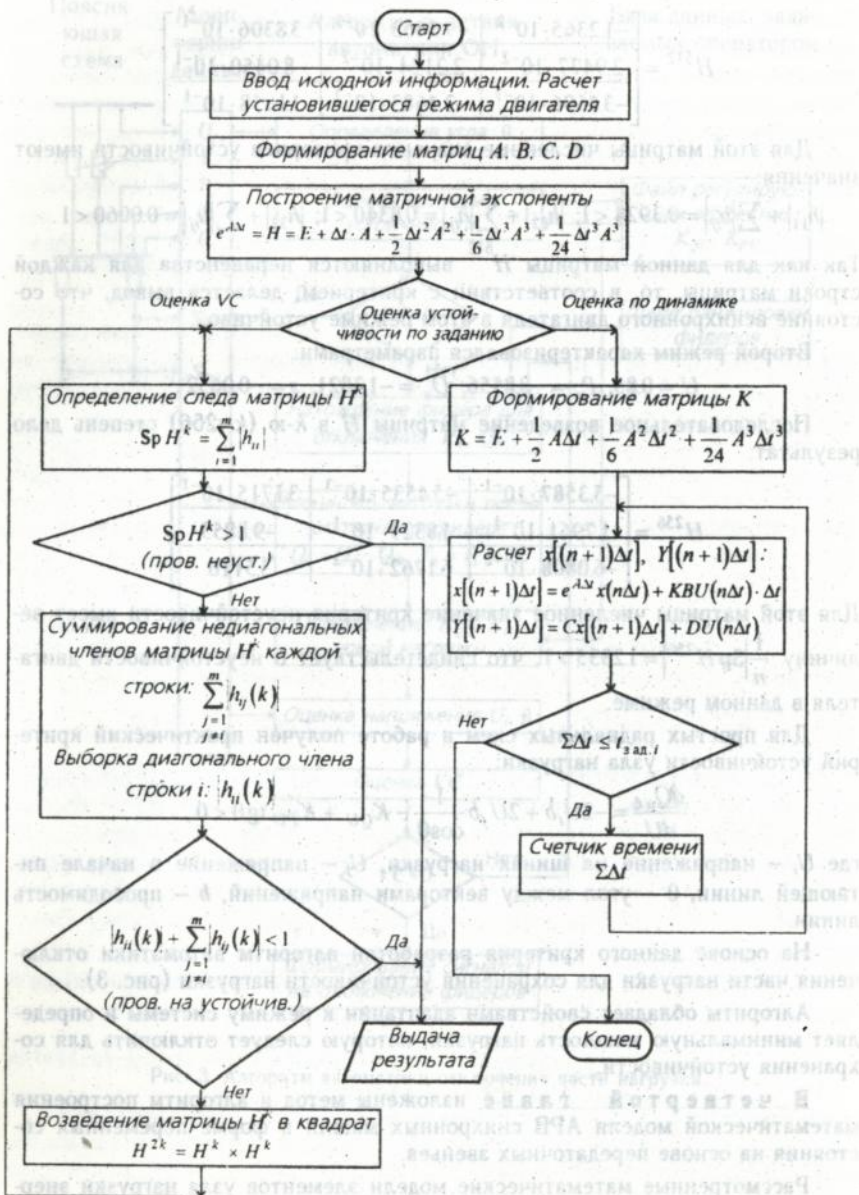


Рис. 2. Алгоритм оценки устойчивости двигателя

$$H^{512} = \begin{bmatrix} -1.2365 \cdot 10^{-2} & -9.3663 \cdot 10^{-3} & 3.8306 \cdot 10^{-1} \\ 2.9477 \cdot 10^{-2} & 2.2124 \cdot 10^{-2} & -8.0450 \cdot 10^{-1} \\ -3.5696 \cdot 10^{-3} & -2.4683 \cdot 10^{-3} & 1.1058 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$$

Для этой матрицы численные значения критериев устойчивости имеют значения:

$$|h_{11}| + \sum |h_{ij}| = 0.3924 < 1; |h_{22}| + \sum |h_{ij}| = 0.8340 < 1; |h_{33}| + \sum |h_{ij}| = 0.0060 < 1.$$

Так как для данной матрицы H^{512} выполняются неравенства для каждой строки матрицы, то, в соответствии с критерием, делается вывод, что состояние асинхронного двигателя в этом режиме устойчиво.

Второй режим характеризовался параметрами:

$$U = 0.85, P_k = -0.8556, Q_k = -1.3821, s = -0.0632.$$

Последовательное возведение матрицы H в k -ю ($k=256$) степень дало результат:

$$H^{256} = \begin{bmatrix} -5.3587 \cdot 10^{-1} & -5.4535 \cdot 10^{-3} & 3.1715 \cdot 10^{-1} \\ 1.7961 \cdot 10^{-1} & 1.8329 \cdot 10^{-1} & -9.8855 \\ -6.0808 \cdot 10^{-2} & 6.1762 \cdot 10^{-2} & 3.5116 \end{bmatrix}$$

Для этой матрицы численное значение критерия неустойчивости имеет величину $\frac{1}{n} |\text{Sp } H^{256}| = 1.2335 > 1$, что свидетельствует о неустойчивости двигателя в данном режиме.

Для простых радиальных схем в работе получен практический критерий устойчивости узла нагрузки:

$$\frac{dQ_{нб}}{dU} = -2U_i b + 2U_j b \frac{1}{\cos \theta} - K_{QU} + K_{PU} \text{tg} \theta < 0,$$

где U_i — напряжение на шинах нагрузки, U_j — напряжение в начале питающей линии, θ — угол между векторами напряжений, b — проводимость линии.

На основе данного критерия разработан алгоритм автоматики отключения части нагрузки для сохранения устойчивости нагрузки (рис. 3).

Алгоритм обладает свойствами адаптации к режиму системы и определяет минимальную мощность нагрузки, которую следует отключить для сохранения устойчивости.

В четвертой главе изложены метод и алгоритм построения математической модели АРВ синхронных машин в форме переменных состояния на основе передаточных звеньев.

Рассмотренные математические модели элементов узла нагрузки энергосистемы в форме переменных состояния при программной реализации представляются в виде жестких структур, что обусловлено небольшим ко-

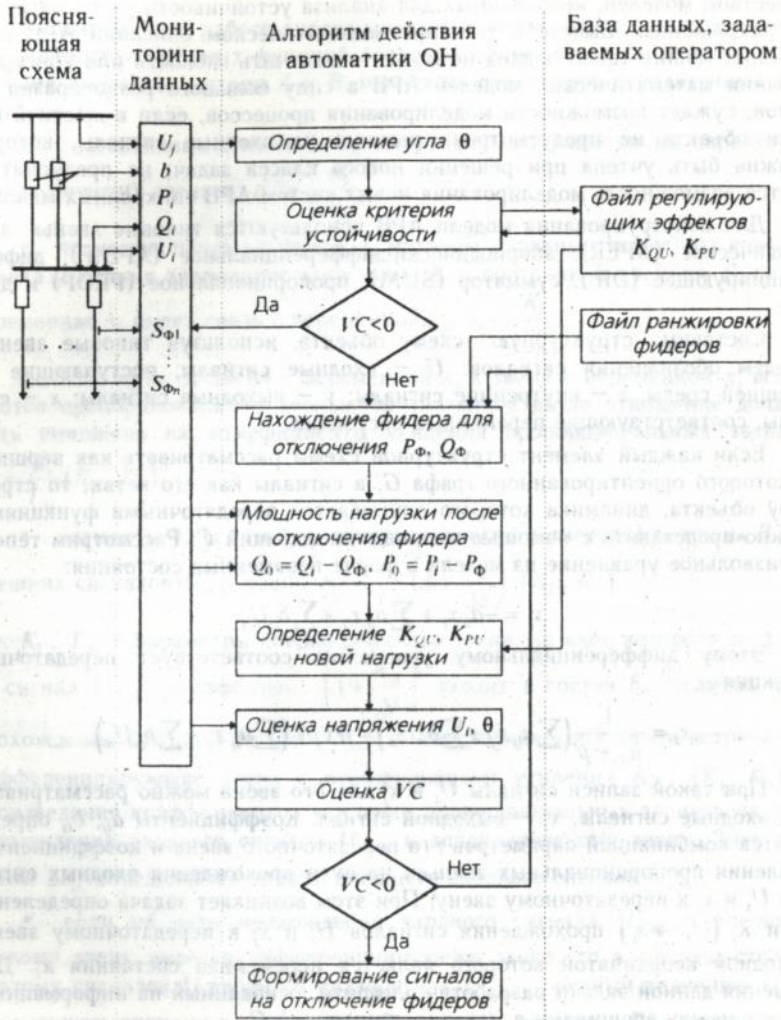


Рис. 3. Алгоритм автоматики отключения части нагрузки.

личеством моделей, необходимых для анализа устойчивости узлов нагрузки по напряжению. Вместе с тем, при математическом описании АРВ синхронных машин такой подход не может обеспечить гибкости при конструировании математических моделей АРВ в силу большого разнообразия их типов; сужает возможности моделирования процессов, если в жесткой модели объекта не предусмотрена реакция на входные сигналы, которая должна быть учтена при решении нового класса задач; не предусматривается возможность моделирования новых систем АРВ синхронных машин.

Для конструирования модели АРВ используются типовые звенья: апериодическое (APER), апериодически-дифференциальное (APDIF), дифференцирующее (DIF), сумматор (SUM), пропорциональное (PROP) и другие.

Составим структурную схему объекта, используя типовые звенья. Введем обозначения сигналов: U – входные сигналы, поступающие из внешней среды; z – внутренние сигналы; y – выходные сигналы; x – сигналы, соответствующие переменным состояниям.

Если каждый элемент структурной схемы рассматривать как вершину некоторого ориентированного графа G , а сигналы как его ветви, то структуру объекта, динамика которого описывается передаточными функциями, можно представить с помощью матрицы инцидентий C . Рассмотрим теперь произвольное уравнение из модели в форме переменных состояний:

$$\dot{x}_i = -a_{ii}x_i + \sum a_{ij}x_j + \sum b_{is}U_s$$

Этому дифференциальному уравнению соответствует передаточная функция

$$x_i = \frac{1}{a_{ii} + p} (\sum a_{ij}x_j + \sum b_{is}U_s) = W(p)_i (\sum a_{ij}x_j + \sum b_{is}U_s)$$

При такой записи сигналы U_s и x_j для i -го звена можно рассматривать как входные сигналы, x_i – выходной сигнал. Коэффициенты a_{ij} , b_{is} определяются комбинацией параметров i -го передаточного звена и коэффициентов усиления пропорциональных звеньев на пути прохождения входных сигналов U_s и x_j к передаточному звену. При этом возникает задача определения пути $\lambda_i (U_s \rightarrow x_i)$ прохождения сигналов U_s и x_j к передаточному звену, выходной координатой которого является переменная состояния x_i . Для решения данной задачи разработан алгоритм, основанный на информации о связях между вершинами в матрице инцидентий C :

- IF для сигнала U_s или x_j в столбце s элемент $C_{\alpha s} = +1$ соответствует вершине α (APER или APDIF или COLB)
- DO U_s или $x_j = U_s$ или x_j (APER или APDIF или COLB)
- ELSE поиск в строке α элемента $C_{\alpha \beta} = -1$
- UND поиск в строке s элемента $C_{\beta s} = +1$

Выполненный в работе анализ моделей в форме переменных состояния и в форме передаточных функций позволил сформулировать правила определения элементов матриц A и B , исходя из параметров передаточных звеньев:

- диагональные элементы a_{ii} матрицы A получаются из параметров

аперiodических звеньев:
$$a_{ii} = -\frac{m_i}{T_{Ai}};$$

- недиагональные элементы a_{ij} матрицы A равны отношению коэффициента усиления аперiodического звена K_i к постоянной времени T_{Ai} , если

переменная x_i имеет связь с переменной x_j :
$$a_{ij} = \frac{K_j}{T_{Ai}}.$$

Если на пути от звена с переменной x_j к звену с переменной x_i встречаются пропорциональные звенья, то указанное выше отношение должно быть умножено на коэффициенты усиления пропорциональных звеньев:

$$a_{ij} = \frac{K_i}{T_{Ai}} (K_1 \dots K_n);$$

- элементы b_{is} (s – номер внешнего входного сигнала) матрицы B для

внешних сигналов $U_{s(n)}$ равны
$$b_{is} = \frac{K_i}{T_{Ai}} \left(1 + \frac{K_d}{\Delta t} \right) \cdot (K_1 \dots K_n),$$

где: K_i , T_{Ai} – параметры аперiodического звена, на вход которого поступает

сигнал $U_{s(n)}$; коэффициент $\left(1 + \frac{K_d}{\Delta t} \right)$ входит в состав b_{is} , если на пути

прохождения входного сигнала $U_{s(n)}$ к аперiodическому звену встречается

дифференцирующее звено с коэффициентом усиления K_d ; $(K_1 \dots K_n)$ –

произведение коэффициентов усиления пропорциональных звеньев на пути

прохождения входного сигнала $U_{s(n)}$ к аперiodическому звену. Знак эле-

мента $\pm b_{is}$ определяется знаком внешнего входного сигнала $U_{s(n)}$.

- если на пути прохождения входного сигнала $U_{s(n)}$ к аперiodическому звену имеется дифференцирующее звено, то в матрицу-столбец

входных сигналов U вводится квазисигнал $U_{s(n-1)}$, равный значению U_s на

предыдущем временном интервале. Элемент b_{is} матрицы B , который соот-

ветствует этому квазисигналу, равен:
$$b_{is} = -\frac{K_i}{T_{Ai}} \frac{K_d}{\Delta t} (K_1 \dots K_n).$$

Предложенный метод и алгоритм формирования математической модели элементов энергосистемы в форме переменных состояния на основе передаточных функций обеспечивает гибкость при построении моделей. При этом в качестве переменных состояния используются физически реализуемые сигналы передаточных звеньев, имеется возможность реализации произвольного числа выходных сигналов.

Следует отметить, что данный подход к построению модели АРВ может быть также использован и для других элементов энергосистемы, если пользователю требуется другая модель объекта, не заложенная в программу расчета устойчивости узлов нагрузки.

На основе изложенного метода и алгоритма выполнена программная реализация (**FORMOD**), использующая современный графический интерфейс человек-машина и дающая возможность пользователю конструировать модель АРВ непосредственно на экране дисплея ПЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача оценки статической устойчивости узлов нагрузки по напряжению сложной энергосистемы, имеющая существенное значение для повышения качества управления режимами энергосистем.

При этом получены следующие основные результаты:

1. Предложен комплексный подход оценки статической устойчивости по напряжению узла нагрузки и его элементов.

2. Выполнено математическое описание комплексного узла нагрузки и его элементов в форме переменных состояния, на базе которого разработаны эффективные алгоритмы оценки устойчивости по напряжению, использующие матричную экспоненту.

3. Разработан практический критерий и алгоритм оценки устойчивости узла нагрузки радиальных схем, на основе которого предложен алгоритм действия автоматики отключения части нагрузки для сохранения ее устойчивости, обладающий свойством адаптации к изменяющемуся режиму энергосистемы.

4. Предложен метод и алгоритм формирования математической модели АРВ синхронных машин в форме переменных состояния на основе передаточных звеньев, что значительно повышает гибкость при моделировании АРВ и позволяет использовать в качестве переменных состояния физически реализуемые переменные.

5. Разработанные методы, модели и алгоритмы позволили реализовать:

- программные модули для оценки устойчивости узлов напряжения;
- программу действия автоматики отключения части нагрузки с помощью устройств микропроцессорной техники;
- программу формирования модели АРВ в форме переменных состояния на основе передаточных звеньев.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Костерев Н.В., Радайда О.Ю.* Метод и алгоритм построения математической модели элементов энергосистемы на основе передаточных функций. Киев, 1996. - 16с. - Деп. в ГНТБ Украины, № 396 - Ук.96.

2. *Радайда О.Ю.* Математическая модель комплексного узла нагрузки энергосистемы в форме переменных состояния. Киев, 1995-9с.-Деп. в ГНТБ Украины, № 2633.- Ук.95.
3. *Радайда О.Ю.* Алгоритм действия автоматики отключения части нагрузки. Киев, 1997-10с.-Деп. в УкрИНТЭИ, № 236.- Уі.97.
4. *Костерев Н.В., Радайда О.Ю.* Определение слабых по устойчивости узлов нагрузки энергосистемы. Киев, 1997-11с.-Деп. в УкрИНТЭИ, № 237.- Уі.97.
5. *Радайда О.Ю.* Оценка устойчивости по напряжению комплексного узла нагрузки// Энергетика и электрификация, Киев, 1997, №3. (В печати).

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: метод и алгоритм формирования модели АРВ на основе передаточных функций [1]; метод оценки слабых по устойчивости узлов нагрузки узлов нагрузки [4].

ANNOTATION

Radaideh Omar Yousef "Improvement of Methods and Algorithms of Static Voltage Stability Evaluation of Load Node in Electric Power Systems". Manuscript.

The dissertstion is presented for the Ph.D. degree in speciality 05.14.02 – "Power Plants (Electical Part), Networks, Electric Power Systems and their Control". National Technical University of Ukraine (KPI), Kyiv, 1997.

In this dissertation, mathematical model of complex unit of load in the form of variable state was developed. Algorithm of evaluation of stability of node of load on the basis of criterions that use matrix exponent was proposed. Practical criterions of stability of node of load of radial grid, on the basis of which algorithm of action of automatic of cut-out part of load was developed. Also were developed method and algorithm of formation of mathematical model of automatic field regulating synchronous machine in the form of variable states on the basis of transfer links. Program of realization of the proposed methods and algorithms was accomplished.

АНОТАЦІЯ

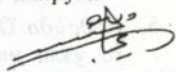
Радайда Омар Юсеф "Вдосконалення методів та алгоритмів оцінки статичної сталості по напрузі вузлів навантаження енергосистем". Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – "Електричні станції (електрична частина), мережі, електроенергетичні системи та керування їми".

В дисертації розроблена математична модель комплексного вузла навантаження в формі змінних стану. Запропоновано алгоритм оцінки ста-

лості вузла навантаження на основі критеріїв, що використовують матричну експоненту. Розроблено практичний критерій сталості вузла навантаження радіальних схем, на базі яких запропоновано алгоритм дії автоматики відключення частини навантаження. Запропоновано метод та алгоритм формування математичної моделі АРЗ синхронних машин у формі змінних стану на основі передавальних ланок. Виконана програмна реалізація запропонованих методів та алгоритмів.

Ключові слова. Математична модель, алгоритм, сталість, вузол навантаження, змінні стану, статичні навантаження, лавина напруги.



Подп. к печ. 08 04 97 Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага тип. № 1 . Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 10
Услови. кр.-отт. 10 . Уч.-изд. л. 10 .
Тираж 100 . Зак. № 7/210 .

Фирма «ВИПОЛ»
252151, г. Киев, ул. Воынская, 60.

436131

AB 37.427