

6
А-63

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В.П. ГУСАКОВ

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОБЛАСТЯМ
УСТОЙЧИВОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

(Специальность 05.275 – "Электрические сети
и системы")

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск-1971 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

В.П.Гусаков

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОБЛАСТЯМ
УСТОЙЧИВОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

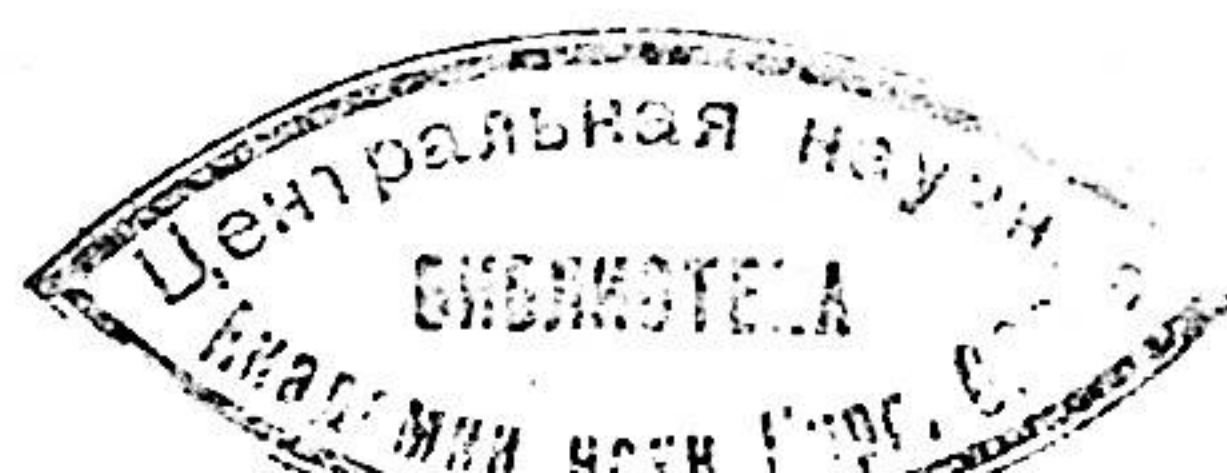
(Специальность 05.275 - "Электрические сети и
системы")

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Минск, 1971



А 63 Работа выполнена на кафедре "Электрические сети и системы"
Ивановского энергетического института имени В.И.Ленина.

Научный руководитель - доктор технических
наук, профессор Д.П.Ледянкин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Поспелов Г.Е.,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Бабочкин В.Т.

Ведущее предприятие - Белглавэнерго Министерства
энергетики и электрификации СССР.

Автореферат разослан " 5 " апреля 1971 г.
Защита состоится " 7 " мая 1971 г. на
заседании Совета по присуждению ученых степеней по
энергетическим специальностям при Белорусском ордена
Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Заверенный и скрепленный печатью отзыв на автореферат в
2-х экземплярах просим направлять по адресу:
г. Минск - 27, Ленинский проспект 65,
Белорусский политехнический институт,
Ученому секретарю Совета.

О дне защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук

Л.Л.Червинский

Быстрое развитие электрических систем, их дальнейшее
объединение в направлении создания Единой энергетической сис-
темы страны определяют задачи исследования по проблеме управ-
ления развитием и режимами сложных энергетических систем.

В решении задач по управлению стационарными и переходны-
ми режимами работы электроэнергетических систем, повышению их
надежности и экономичности важное значение имеет разработка
новых методов анализа статической устойчивости с целью получе-
ния информации по режимным параметрам, необходимой для управ-
ления режимами; повышения достоверности результатов исследо-
ваний, обоснованного нормирования запасов устойчивости, а так-
же с целью выявления дополнительных возможностей регулирова-
ния для повышения устойчивости работы систем.

В связи с выдвинутыми актуальными вопросами в данной ра-
боте рассматривается задача определения устойчивости возмож-
ных режимов работы и их запасов для сложных энергетических
систем в трехмерном пространстве режимных параметров: актив-
ной, реактивной мощностей и напряжения.

С учетом вариаций режима электрической системы для более
полного и наглядного представления о запасе статической ус-
тойчивости и удаленности по требованиям устойчивости от кри-
тического режима целесообразно использовать области устойчи-
вости в пространстве трех основных вышеуказанных режимных
параметров. Использование таких областей статической устой-
чивости в пространстве режимных параметров удобно при проек-
тировании и эксплуатации электрических систем и их режимов
работы.

Причем выделение областей устойчивости в пространстве
режимных параметров целесообразно как при оценке аперодич-

ческой, так и колебательной устойчивости электрической системы с точки зрения идентичности определения запасов режима работы системы относительно границы области устойчивости.

Эффективность использования таких областей устойчивости заключается в том, что предельные показатели синхронной работы системы будут определяться сразу по трем основным режимным параметрам, что очень важно для правильного и уверенного ведения режима работы синхронных генераторов в практике эксплуатации электрических станций и энергосистем в целом.

Для уточненного определения предельных значений режимных параметров по условию сохранения статической устойчивости в сложной электрической системе расчеты целесообразно проводить с использованием частотных методов анализа статической устойчивости электрической системы. В качестве метода исследования при решении задачи анализа статической устойчивости синхронных генераторов принят частотно-фазовый метод оценки статической устойчивости электрической системы, который основан на представлении всех элементов электрической системы соответствующими частотными характеристиками и позволяет использовать экспериментально полученные частотные характеристики отдельных элементов и их групп. Кроме того, частотно-фазовый метод менее чувствителен к вариации исходной информации, чем, например, метод Д-разбиения, с определением процессов по уравнениям малых отклонений.

Поэтому в данной работе ставится задача анализа статической устойчивости сложной системы при представлении каждой станции эквивалентной машиной по областям устойчивости в пространстве режимных параметров с использованием частотных характеристик элементов электрической системы.

В связи с основной задачей в первом разделе работы приводится методика расчета частотных характеристик асинхронных машин, рассматривается методика экспериментального определения частотных характеристик нагрузки, а также излагается методика расчета частотных характеристик сложных систем.

Второй раздел посвящен рассмотрению методики выделения областей статической устойчивости синхронных генераторов в пространстве режимных параметров как по апериодической, так и колебательной устойчивости с использованием частотных характеристик элементов системы.

В третьем разделе работы разрабатываются алгоритмы расчета областей устойчивости. Приводятся данные анализа статической устойчивости синхронного генератора по областям устойчивости в пространстве режимных параметров по результатам расчета с помощью ЦВМ.

Теоретические выводы, полученные в работе, проверялись экспериментально на электродинамической модели в Проблемной лаборатории кафедры "Электрические системы" Московского энергетического института. Основные результаты работы изложены в [1 + 9] и обсуждались на республиканской научно-методической конференции в г.Павлодаре по вопросам оптимизации развития и эксплуатации энергосистем и итоговых научно-технических конференциях Ивановского энергетического института имени В.И.Ленина.

Работа состоит из введения, трех разделов, заключения и восьми приложений.

I. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С развитием энергетических систем предъявляются повышенные требования к точности исследования переходных процессов, происходящих в системах, с целью обеспечения надежной работы энергосистем с меньшими запасами устойчивости, что, несомненно, повышает экономичность режимов работы систем. Поэтому становится необходимым более точное математическое описание как отдельных элементов электрической системы, так и их совокупностей. Всесторонняя информация о протекании в системе переходных процессов в "малом" может быть получена с помощью частотных характеристик, которыми определяются все элементы электрической системы.

Частотно-фазовый метод исследования статической устойчивости предопределяет две формы определения частотных характеристик в соответствии с двумя формами записи уравнений динамики элементов и частей электрической системы или в виде проводимостей, или в виде сопротивлений

$$\Delta \dot{I}_{a1} = Y_{11}(j\omega) \Delta \dot{U}_{a1} + Y_{12}(j\omega) e^{j2\beta_0} \Delta \dot{U}_{a2}, \quad (1)$$

$$\Delta \dot{I}_{a2} = Y_{21}(j\omega) e^{-j2\beta_0} \Delta \dot{U}_{a1} + Y_{22}(j\omega) \Delta \dot{U}_{a2}, \quad (2)$$

или

$$\Delta \dot{U}_{a1} = Z_{11}(j\omega) \Delta \dot{I}_{a1} + Z_{12}(j\omega) e^{j2\beta_0} \Delta \dot{I}_{a2}, \quad (3)$$

$$\Delta \dot{U}_{a2} = Z_{21}(j\omega) e^{-j2\beta_0} \Delta \dot{I}_{a1} + Z_{22}(j\omega) \Delta \dot{I}_{a2}, \quad (4)$$

где $\Delta \dot{I}_{an}, \Delta \dot{U}_{an}$ — составляющие отклонений токов и напряжений для прямой и обратной последовательностей, приведенные к основной частоте системы.

$Y_{ij}(j\omega), Z_{ij}(j\omega)$ — полные частотные характеристики соответственно проводимости или сопротивления.

Показано расчетное определение таких полных частотных характеристик проводимости и сопротивления для синхронных и асинхронных машин. Данные частотные характеристики для синхронных машин зависят как от входных частотных сопротивлений по продольной и поперечной осям, так же от режимных параметров и выполнения системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Для асинхронных машин проанализированы данные частотные характеристики в функции режимных параметров. Кроме того, уточнена методика расчета частотных характеристик асинхронных машин с учетом их активных сопротивлений и отличия сопротивлений по цепям статора и ротора.

Но наиболее полная и точная информация о протекании переходного процесса в системе может быть получена с помощью экспериментальных частотных характеристик. В связи с этим предлагается метод экспериментального определения частотных характеристик комплексной нагрузки с помощью периодических возмущений.

Уравнение динамики нагрузки в полных отклонениях запишется как

$$\Delta I' = Y_n(p) \Delta U' + Y_{12}(p) \Delta \hat{U}, \quad (5)$$

где $\Delta I', \Delta U'$ — отклонение тока и напряжения на зажимах нагрузки в режиме малых вынужденных колебаний, приведенные к основной частоте,

$Y_n(p), Y_{12}(p)$ — полные операторные характеристики проводимости нагрузки.

Переходя к гармоническим возмущениям, рассматриваются два режима работы нагрузки.

Первый режим соответствует гармоническому изменению лишь величины отклонения напряжения на зажимах нагрузки. Этот режим можно осуществить по схеме: работа синхронного генератора на комплексную нагрузку в случае колебательного изменения напряжения возбуждения синхронного генератора. По изменению режимных параметров на зажимах нагрузки можно определить амплитудно-фазовые частотные характеристики нагрузки по напряжению

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta U_m} e^{j(\tau_p - \tau_u)}, \quad \frac{\Delta Q_m}{\Delta U_m} e^{j(\tau_q - \tau_u)} \quad (6)$$

Второй режим соответствует гармоническому изменению лишь величины отклонения частоты на зажимах нагрузки. Этот режим можно осуществить также по схеме: работа синхронного генератора на комплексную нагрузку в случае колебательного изменения скорости вращения ротора синхронного генератора. По изменению режимных параметров на зажимах нагрузки можно определить амплитудно-фазовые характеристики по частоте

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta f_m} e^{j(\tau_p - \tau_f)}, \quad \frac{\Delta Q_m}{\Delta f_m} e^{j(\tau_q - \tau_f)} \quad (7)$$

Составляющие частотных характеристик проводимости определяются с учетом (6), (7) следующими соотношениями

$$Y_1'(j\gamma) = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta P_m}{U_{ep} \Delta U_m} e^{j(\tau_p - \tau_u)} - \frac{j\gamma \Delta Q_m}{U_{ep}^2 \Delta f_m} e^{j(\tau_q - \tau_f)} \right], \quad (8)$$

$$Y_1''(j\gamma) = \frac{1}{2} \left[-\frac{\Delta Q_m}{U_{ep} \Delta U_m} e^{j(\tau_q - \tau_u)} - \frac{j\gamma \Delta P_m}{U_{ep}^2 \Delta f_m} e^{j(\tau_p - \tau_f)} \right], \quad (9)$$

$$Y_2'(j\gamma) = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta P_m}{U_{ep} \Delta U_m} e^{j(\tau_p - \tau_u)} + \frac{j\gamma \Delta Q_m}{U_{ep}^2 \Delta f_m} e^{j(\tau_q - \tau_f)} - \frac{2P_{ep}}{U_{ep}^2} \right], \quad (10)$$

$$Y_2''(j\gamma) = \frac{1}{2} \left[-\frac{\Delta Q_m}{U_{ep} \Delta U_m} e^{j(\tau_q - \tau_u)} + \frac{j\gamma \Delta P_m}{U_{ep}^2 \Delta f_m} e^{j(\tau_p - \tau_f)} + \frac{2Q_{ep}}{U_{ep}^2} \right]. \quad (11)$$

Полные значения частотных характеристик проводимости комплексной нагрузки определяются

$$Y_{11}(j\gamma) = Y_1'(j\gamma) + j Y_1''(j\gamma), \quad (12)$$

$$Y_{22}(j\gamma) = Y_2'(j\gamma) - j Y_2''(j\gamma), \quad (13)$$

$$Y_{12}(j\gamma) = [Y_1'(j\gamma) + j Y_2''(j\gamma)] e^{j\beta_0}, \quad (14)$$

$$Y_{21}(j\gamma) = [Y_2'(j\gamma) - j Y_1''(j\gamma)] e^{-j\beta_0} \quad (15)$$

Так как частотные характеристики нагрузки устанавливаются по ее рабочему режиму, то это обстоятельство позволяет точно учесть все влияющие факторы, например, насыщение машин.

Данную методику экспериментального определения частотных характеристик можно распространить и на часть системы с одной точкой примыкания, когда форма записи уравнения динамики ее аналогична (5).

Проведено экспериментальное определение частотных характеристик проводимости нагрузки, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки, а также отдельно для асинхронного двигателя. Сопоставление расчетных и экспериментальных

частотных характеристик дает вполне удовлетворительные результаты.

Для анализа частотно-фазовым методом статической устойчивости синхронных машин, работающих на сложную электрическую систему, возникает задача определения частотных характеристик проводимости всей приемной системы.

По отношению к любому узлу вся система будет характеризоваться четырьмя частотными характеристиками:

$$Y_{11}(k)(j\gamma), Y_{12}(k)(j\gamma)e^{j^2\beta_k}, Y_{22}(k)(j\gamma), Y_{21}(k)(j\gamma)e^{-j^2\beta_k}.$$

В связи с этим рассматривается методика расчета частотных характеристик электрической системы по схеме замещения ее. Параметры схемы замещения определяются:

$$Y_{pp}(j\gamma) = Y_{11}(k)(j\gamma) + Y_{12}(k)(j\gamma)e^{j^2\beta_k}, \quad (16)$$

$$Y_{qq}(j\gamma) = Y_{22}(k)(j\gamma) + Y_{21}(k)(j\gamma)e^{-j^2\beta_k}, \quad (17)$$

$$Y_{pq}(j\gamma) = -Y_{12}(k)(j\gamma)e^{j^2\beta_k}, \quad (18)$$

$$Y_{qp}(j\gamma) = -Y_{21}(k)(j\gamma)e^{-j^2\beta_k}. \quad (19)$$

Частотные характеристики проводимости $Y_{ij}(k)(j\gamma)$ определялись с помощью цифровой вычислительной машины (ЦВМ). Методика расчета строилась на использовании схемы замещения электрической системы по прямой и обратной последовательностям отклонений тока и напряжения для режима установившихся вынужденных колебаний, вследствие чего каждый элемент схемы представлялся четырехполюсником.

Расчет производился следующим образом. В узлах p, q ,

отражающих во взаимосвязанных схемах замещения по прямой и обратной последовательностям какой-либо узел системы (K), для которого необходимо рассчитать частотные характеристики примыкающей части сети, поочередно прикладывается некоторое фиксированное напряжение U_p, U_q . Рассчитав токи в ветвях, можно определить частотные характеристики проводимостей в узлах

а) собственная частотная характеристика проводимости узла

$$Y_{ii}(k)(j\gamma) = \frac{I_p}{U_p}, \quad (i=1,2) \quad (20)$$

б) взаимная частотная характеристика проводимости узла

$$Y_{ij}(k)(j\gamma) = \frac{I_p}{U_q} \quad (21)$$

$$(i=1,2, j=1,2, i \neq j)$$

Для расчета токов выбран метод узловых напряжений, по которому напряжение в каждом узле схемы замещения будет определяться, как

$$U_p = \frac{\sum_{q=1}^{q=n} U_q Y_{pq}(j\gamma)}{\sum_{q=1}^{q=n} Y_{pq}(j\gamma)}, \quad (22)$$

где p - номер узла схемы замещения, для которого определяется напряжение.

q - номера узлов, связанных с узлом p .

Уравнения узловых напряжений вида (22) решаются итеративным методом Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса. Итерационный расчет заканчивается, если разности значений рассчитываемых напряжений в смежных итерациях меньше некоторой заданной величины ϵ , как по дейст-

вительной, так и по мнимой частям напряжения.

По данной методике разработан алгоритм расчета и составлена программа для ЦВМ "Урал-2". Программа позволяет считать частотные характеристики для схемы замещения с количеством узловых точек $n \leq 100$ и количеством ветвей $m \leq 125$. Программа может быть применена для задачи большего объема, ибо частотные характеристики большей системы можно считать по частотным характеристикам отдельных ее частей, рассчитанных предварительно по той же программе.

2. ОБЛАСТИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОСТРАНСТВЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

При анализе статической устойчивости электрической системы, когда требуется определить влияние значений каких-либо варьируемых параметров на устойчивость, строят области устойчивости системы в пространстве этих варьируемых параметров. Для выявления области устойчивости в пространстве режимных параметров необходимо граничные условия поддержания устойчивости определить в зависимости от значений режимных параметров. В качестве их для регулируемого генератора используются активная мощность, коэффициент мощности (или реактивная мощность) и напряжение на его шинах, так как эти параметры являются основными, определяющими режим работы генератора.

По таким областям устойчивости определяются все допустимые варианты режима работы генератора по требованиям сохранения статической устойчивости. Для определения границ областей по апериодической и колебательной устойчивости предполагается, что режим работы регулируемого генератора с установившимися

значениями активной мощности, реактивной мощности и напряжения находится на границе устойчивости. Возникшие в этом случае невозмущенные гармонические колебания напряжения и тока генератора можно определить по составляющим отклонений прямой и обратной последовательностей при условии, что

$$\Delta U_n = \Delta U_{a1} e^{j\beta} + \Delta U_{a2} e^{-j\beta} \quad (23)$$

$$\Delta I_n = \Delta I_{a1} e^{j\beta} + \Delta I_{a2} e^{-j\beta} \quad (24)$$

Для малых изменений уравнение генератора запишется

$$\Delta U_{a1} = P_1(j\beta) \Delta I_{a1} + P_2(j\beta) e^{j2\beta} \Delta I_{a2} + R(j\beta) e^{j\beta} \Delta U_0 \quad (25)$$

$$\Delta U_{a2} = \hat{P}_2(-j\beta) e^{-j2\beta} \Delta I_{a1} + \hat{P}_1(-j\beta) \Delta I_{a2} + \hat{R}(-j\beta) e^{-j\beta} \Delta U_0 \quad (26)$$

где β — угол положения вектора напряжения относительно оси отсчета.

$P_1(j\beta)$, $\hat{P}_1(-j\beta)$ — частотные характеристики сопротивления синхронного генератора по составляющим отклонений соответственно прямой и обратной последовательностей.

$P_2(j\beta) e^{j2\beta}$, $\hat{P}_2(-j\beta) e^{-j2\beta}$ — частотные характеристики сопротивления связи соответственно по отклонению напряжения прямой последовательности с током обратной последовательности и напряжения обратной последовательности с током прямой последовательности.

$R(j\beta) e^{j\beta}$, $\hat{R}(-j\beta) e^{-j\beta}$ — амплитудно-фазовые частотные характеристики генератора по связи отклонения ЭДС его с отклонением напряжения на шинах генератора соответственно для составляющих отклонений прямой и обратной последовательностей.

Уравнение регулирования возбуждения синхронного генератора определится, как

$$\Delta U_0 = K_i(j\gamma) \Delta \dot{I}_{a1} + K_i(-j\gamma) \Delta \dot{I}_{a2} + K_u(j\gamma) \Delta U_{a1} + K_u(-j\gamma) \Delta U_{a2}, \quad (27)$$

где $K_i(j\gamma)$, $K_u(j\gamma)$ — амплитудно-фазовые частотные характеристики системы регулирования возбуждения, зависящие от выполнения регулирования возбуждения.

Уравнение электрической системы относительно шин генератора для малых изменений можно записать

$$\Delta U_{a1} = X_{11}(j\gamma) \Delta \dot{I}_{a1} + X_{12}(j\gamma) e^{j2\beta} \Delta \dot{I}_{a2}, \quad (28)$$

$$\Delta U_{a2} = X_{21}(j\gamma) e^{-j2\beta} \Delta \dot{I}_{a1} + X_{22}(j\gamma) \Delta \dot{I}_{a2}, \quad (29)$$

где $X_{ij}(j\gamma)$ — частотные характеристики примыкающей системы.

Уравнения границ области устойчивости определяются из условия, что определитель системы уравнений (25) + (29) равен нулю

$$D(\delta_0, U, \varphi, j\gamma) = 0. \quad (30)$$

Вычисляя определитель (30), получаются два уравнения границ области устойчивости

$$W(\delta_0, U, \varphi, \gamma) = 0, \quad (31)$$

$$V(\delta_0, U, \varphi, \gamma) = 0. \quad (32)$$

По решениям системы уравнений (31), (32) определяются зависимости:

$$\delta_0 = f_1(\gamma, \varphi), \quad (33)$$

$$U = f_2(\gamma, \varphi) \quad (34)$$

граничных значений параметров δ_0, U, φ по условию поддержания устойчивости электрической системы.

Используя соотношение

$$P = \frac{U^2}{\sin \delta_0 (x_q - x_d \tan \varphi) - x_q \tan \varphi - x_d} \quad (35)$$

по данным решений (33), (34) можно рассчитать границы области статической устойчивости синхронного генератора в пространстве режимных параметров $P, U, \cos \varphi$ (или Q).

При оценке аperiodической устойчивости следует считать, что частота вынужденных колебаний

$$\gamma = 0 \quad (36)$$

В этом случае уравнение (31) превращается в тождество и граничные значения параметров

$$\delta_0 = f(\varphi) \quad (37)$$

найдутся по решениям уравнения (32).

Согласно определению (35), по данным решений (37) можно рассчитать и построить области аperiodической устойчивости синхронного генератора в плоскости параметров $\frac{P_{\cos}}{U_{\cos}^2}$, $\cos \varphi$ или $\frac{P_{\cos}}{U_{\cos}^2}$, $\frac{Q_{\cos}}{U_{\cos}^2}$. Для каждого значения $\cos \varphi$ режимы работы электрической системы подобны по аperiodической устойчивости, когда $\frac{P_{\cos}}{U_{\cos}^2} = \text{const.}$

В реферируемой работе проведено сопоставление результатов расчета предельного внутреннего угла δ_0 между векторами ЭДС и напряжения на шинах генератора по предложенной

производная по δ с использованием критерия аperiodической устойчивости $\frac{dP}{d\delta} = 0$. В частности, для работы синхронного генератора на шине бесконечной мощности предельное значение внутреннего угла δ_0 будет определяться выражением (38)

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{\gamma}{2} \operatorname{tg} \varphi + \sqrt{\frac{M^2}{4} \operatorname{tg}^2 \varphi - 1 - M}, \quad (38)$$

где $M = \frac{1}{\cos \varphi_1 \cos \alpha_{11}}$

α — нагрузочный угол,

что полностью соответствует пределу по условию

$$\frac{dP}{d\delta} = 0$$

Для экспериментальной проверки методики определения областей статической устойчивости синхронных генераторов по областям устойчивости в пространстве режимных параметров были проведены опыты на электродинамической модели по снятию таких областей для модельного генератора, работающего через электрическую сеть на шине бесконечной мощности. Сопоставление экспериментальных и расчетных границ областей устойчивости показывает вполне удовлетворительное их совпадение.

Для расчетного определения границ областей статической устойчивости можно использовать экспериментальные данные по элементам исследуемой схемы.

Предлагаемая методика определения областей устойчивости в пространстве режимных параметров основана на использовании частотных характеристик синхронного генератора и примыкающей электрической системы. Согласно разработанной методике грани-

цы областей определяются как для аperiodической, так и для колебательной устойчивости синхронного генератора.

По областям устойчивости в пространстве режимных параметров для известного режима работы синхронного генератора можно определять запасы как по аperiodической, так и колебательной устойчивости, исходя из предельно передаваемой мощности на границе устойчивости и значения мощности в заданном режиме работы.

3. АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ЦВМ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Успешное решение современных энергетических задач с большим числом трудоемких расчетов, с привлечением сравнительно сложных математических методов анализа требует обязательного применения разнообразных средств современной вычислительной техники, в том числе ЦВМ, которые позволяют исследовать процессы в сколь угодно сложных системах и дают возможность исключительно эффективно анализировать многочисленные практически важные вопросы.

Для определения границ областей аperiodической устойчивости в пространстве режимных параметров необходимо решить уравнение вида (32). Для нахождения корней такого трансцендентного уравнения использован итерационный метод Вегстейна, обладающий быстрой и хорошей сходимостью независимо от величины производной функции. Итерационная формула записывается, как

$$\delta_{b(n+1)} = \delta_{b(n)} + A F(\delta_{b(n)}) \quad (39)$$

где A — соответствующим образом выбранная, отличная от нуля постоянная.

Но для быстрой и хорошей сходимости итерационного процесса

вводится модификация, определяющаяся выражением

$$\bar{\delta}_v(n+1) = \bar{\delta}_v(n+1) - \frac{(\bar{\delta}_v(n+1) - \bar{\delta}_v(n))(\bar{\delta}_v(n-1) - \bar{\delta}_v(n))}{(\bar{\delta}_v(n+1) - \bar{\delta}_v(n) - \bar{\delta}_v(n) + \bar{\delta}_v(n-1))} \quad (40)$$

Эта формула дает значение величины $\bar{\delta}_v(n+1)$, используемой вместо $\bar{\delta}_v(n+1)$

Для определения границ областей колебательной устойчивости необходимо решить систему трансцендентных уравнений (31), (32) с нелинейной зависимостью выделяемых переменных. Для решения этих уравнений использован обобщенный метод Ньютона-Рафсона, который при малом числе переменных обладает достаточно быстрой сходимостью. По методу Ньютона-Рафсона за счет последовательного уточнения переменных отыскивается глобальный минимум дополнительной функции.

$$S = W^2 + V^2, \quad (41)$$

которая всегда является вещественной функцией и либо положительна, либо равна нулю.

Алгоритмы расчета границ областей апериодической и колебательной устойчивости в пространстве режимных параметров составлены для общего случая работы генератора на сложную электрическую систему.

С помощью ЦВМ был произведен анализ статической устойчивости синхронного генератора по режимным параметрам при работе его через линию электропередачи на шины бесконечной мощности.

Выявлено влияние различных параметров линии электропередачи и синхронного генератора на конфигурацию его областей как по колебательной, так и апериодической устойчивости в

пространстве режимных параметров.

Так, например, отмечено расширение области апериодической устойчивости при уменьшении длины ЛЭП и увеличении числа проводов в фазе. Отмечено также сужение области колебательной устойчивости при увеличении сопротивления рассеяния синхронного генератора и незначительное увеличение области при уменьшении постоянной инерции его.

Использование закона регулирования возбуждения сильного действия значительно расширяет области колебательной устойчивости.

Предложенные алгоритмы можно применять для оценки статической устойчивости как общего так и относительного движения генераторов в электрической системе.

ВЫВОДЫ

1. По отношению к каждой электрической станции статическая устойчивость электрической системы вполне характеризуется трехмерной областью устойчивости в пространстве основных режимных параметров: активной мощности, реактивной мощности и напряжения.

При практических расчетах устойчивость режима работы станций определится семейством областей устойчивости в плоскости, например, активной мощности и коэффициента мощности при различных значениях напряжения.

2. По требованиям статической устойчивости согласно разработанной методике допустимые режимы работы эквивалентного генератора, представляющего электрическую станцию, по апериодической и колебательной устойчивости определяются в пространстве режимных параметров различными областями устойчивости.

Данные области устойчивости позволяют наглядно оценить влияние изменения режимных параметров на статическую устойчивость синхронных генераторов. Они также могут быть использованы для определения запасов режимов работы синхронных генераторов как по колебательной, так и апериодической устойчивости.

3. Разработаны алгоритмы расчета границ областей колебательной и апериодической устойчивости для синхронного генератора электрической системы.

Предложенные алгоритмы расчета областей статической устойчивости электрической системы позволяют использовать в качестве исходной информации частотные характеристики синхронных машин и их систем АРВ, а также частотные характеристики приемной системы, которые могут быть получены и по экспериментальным данным.

Целесообразность построения расчета по частотным характеристикам заключается в их полной информации о процессах, происходящих в системе и использовании экспериментальных частотных характеристик, что, естественно, может повысить точность расчетов при учете случайных факторов, влияющих на частотные характеристики.

4. Разработан метод определения частотных характеристик проводимости приемной системы по данным о частотных характеристиках ее узлов.

Алгоритм расчета построен на использовании метода узловых напряжений с решением системы уравнений итерационным методом Зейделя-Гаусса.

5. Разработан метод экспериментального определения частотных характеристик проводимости узлов нагрузки с помощью периодических возмущений по данным двух испытаний, когда по

первому опыту колебания подаются в обмотку возбуждения синхронного генератора, по второму опыту в регулятор скорости первичного двигателя синхронного генератора, питающего узел нагрузки.

6. Проанализировано влияние на области апериодической и колебательной устойчивости синхронного генератора, работающего через электрическую сеть на шины бесконечной мощности, параметров ЛЭП, сопротивления рассеяния генератора и его постоянной инерции, а также законов регулирования системы возбуждения генератора.

7. Основные теоретические положения реферируемой работы проверены на электродинамической модели. Экспериментальные исследования подтверждают возможность применения изложенной методики для оценки статической устойчивости электрической системы по областям устойчивости в пространстве режимных параметров.

8. Предложенная методика оценки статической устойчивости синхронных генераторов по областям устойчивости в пространстве режимных параметров может быть практически использована при проектировании электрических систем для уточненных расчетов, позволяющих выявить обеспечение статической устойчивости при соответствующих принятых решениях по системе АРВ и схеме связи с системой.

Методика может быть использована в практике эксплуатации электрических станций для проверки существующих и намечаемых режимов работы синхронных генераторов по требованиям статической устойчивости.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, Частотные характеристики асинхронных двигателей, Известия высших учебных заведений, Энергетика, 1969, № 5.

2. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, Определение областей статической устойчивости электрической системы в пространстве режимных параметров, Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1970, № 2.

3. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, М.В. Макарина, Экспериментальное определение частотных характеристик нагрузки, Известия высших учебных заведений, Энергетика, 1970, № 3.

4. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, Применение ЭЦВМ для расчета областей устойчивости электрической системы по частотным характеристикам в пространстве режимных параметров, Материалы республиканской научно-методической конференции по вопросам оптимизации развития и эксплуатации энергосистем, Павлодар, 1969.

5. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, Определение частотных характеристик нагрузки, в сборнике "Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции", ИЭИ, Иваново, 1967.

6. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, Методика расчета частотных характеристик асинхронного двигателя, в сборнике "Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции и 50-летию со дня основания института", ИЭИ, Иваново, 1968.

7. В.П. Гусаков, Экспериментальная проверка методики определения областей устойчивости генератора в пространстве режимных параметров, в сборнике "Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции", ИЭИ, Иваново, 1969.

8. В.П. Гусаков, Расчет областей устойчивости синхронного генератора в пространстве режимных параметров на ЦВМ "Урал-2", в сборнике "Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции", ИЭИ, Иваново, 1970.

9. Д.П. Ледянкин, В.П. Гусаков, М.В. Макарина, Экспериментальное определение частотных характеристик асинхронной нагрузки, в сборнике "Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции", ИЭИ, Иваново, 1970.