

- ческой устойчивости сложных электрических систем с помощью метода Д-разбиения на ЦВМ.— Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1966, 2.
4. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, М.— Л., 1950.
 5. Горушкин В. И., Латышева Т. С. Исследование статической устойчивости энергосистемы с помощью уравнений установившихся режимов.— Электричество, 1969, 5.
 6. Горюнов Ю. П., Ножин Л. Э., Щербачев О. В. Программа расчетов на ЦВМ режимов сложных электрических систем предельных по сползанию.— В кн.: Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. «Энергия», М., 1969.
 7. Жданов П. С. О статической устойчивости сложных электрических систем.— В кн.: Труды ВЭИ, 40. Госэнергоиздат, М., 1940.
 8. Идельчик В. И. Свойства решения уравнений стационарного режима сложных энергосистем. Изд. Иркутского политехнического ин-та, Иркутск, 1970.
 9. Маркович И. М., Баринов В. А. О критерии статической устойчивости, базирующемся на сходимости итерационного процесса исследуемого режима.— Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1970, 5.
 10. Смирнов К. А. О единственности решения при расчете электрического режима и при расчете оптимального распределения мощностей в энергосистеме.— В кн.: Проблемы электроэнергетики. «Наука», М., 1966.
 11. Цукерник Л. В. Общая теория устойчивости Ляпунова и вопросы устойчивости энергосистем.— Электричество, 1959, 1.
 12. Цукерник Л. В., Коробчук К. В. Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости (при отсутствии самораскачивания) сложной энергосистемы.— В кн.: Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. «Энергия», М., 1969.
 13. Цукерник Л. В. Анализ матрицы коэффициентов уравнений возмущенного движения сложной энергетической системы.— В кн.: Труды Института электротехники АН УССР, 16. Изд-во АН УССР, К., 1959.
 14. Цукерник Л. В., Коробчук К. В. Исследование соответствия предела статической устойчивости энергетической системы нарушению сходимости итерационного расчета ее установившегося режима.— Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1969, 6.

Л. В. Цукерник, К. В. Коробчук, П. А. Черненко

(Институт электродинамики АН УССР)

Статистические модели оценки влияния погрешности исходных данных на результаты расчета установившегося режима и статической (апериодической) устойчивости энергосистем

Оценка влияния случайной погрешности исходных данных на результаты расчета на ЦВМ режимов сложных электроэнергетических систем является важной практической задачей. Для ее решения в последнее время широко применяется метод статистических испытаний Монте-Карло [2, 3, 6, 10, 16 и др.]. Приведенные в статье две статистические модели оценки погрешности исходных данных на результаты расчета установившегося режима и статической устойчивости также построены на его основе. В работе [5] дано описание алгоритма и программы оценки влияния погрешности исходных данных на результаты расчета установившегося режима энергосистемы. Программа была составлена для выполнения примерных расчетов, а приведенные результаты и рекомендации имели поэтому ограниченный характер. Возникла необходимость создать универсальный алгоритм и программу, позволяющую производственным организациям проводить серийные расчеты по оценке влияния погрешности исходных данных на результаты расчета установившегося режима энергосистемы. Данная статья посвящена описанию такого алгоритма и программы.

Статистическая модель установившегося режима состоит из трех самостоятельных блоков: 1) вариации исходных данных (И. Д.) в заданном интервале изменения по принятому вероятностному закону распределения;

2) расчет установившегося режима по программе 1—13 [13]; 3) статистическая обработка результатов расчета.

Блочный принцип построения модели делает ее универсальной и удобной для дальнейшей стыковки (с небольшими изменениями) с различными программами расчета режимов энергосистемы. В соответствии с видом задания исходной информации, предусмотренным программой 1—13 (отдельными массивами чисел: параметров узлов и ветвей), исходные данные в статистической модели условно разбиваются на две группы: параметры сети (сопротивления R , X , X_c и коэффициенты трансформации трансформаторов k_T); параметры режима (активные, реактивные мощности и модули напряжения генераторных и нагрузочных узлов).

В качестве выходных параметров принимаются следующие расчетные величины установившегося режима энергосистемы: $\Sigma \Delta P$ — суммарные потери активной мощности; $\Sigma \Delta Q$ — суммарные потери реактивной мощности; $|U|$ — модули напряжения в заданных узлах связи с другими энергосистемами; P и I — соответственно потоки активной мощности и токи по межсистемным линиям связи.

Поскольку известно [7], что погрешность в задании шунтов в узлах системы (при П-образной схеме замещения линий) будет влиять на величину погрешностей выходных параметров, то их вариация при расчете режима также производится. В настоящей статье предусмотрена оценка выходных параметров в случаях, когда варьируют (в пределах заданных интервалов погрешностей) все параметры сети и режима одновременно, одна группа параметров (сети или режима) или отдельно взятые параметры указанных групп.

Величина интервала и вид вероятностного закона распределения могут быть заданы одинаковыми для всей группы параметров или индивидуальными для каждого параметра. Для всех трансформаторов предполагается единая величина погрешности коэффициентов трансформации, равная 1% [8].

Выбор варьируемых параметров с заданными погрешностями и законом распределения осуществляется в программе следующим образом. Узлы и ветви, параметры которых в результате расчета режима принимаются в качестве выходных (за исключением суммарных активных и реактивных потерь), отмечаются соответствующим признаком при записи исходных данных. В программе в качестве генераторов случайных чисел, распределенных по нормальному ($m = 0$, $\sigma = 1$) и равномерному (в интервале $[0,1]$) законам распределения, используются стандартные подпрограммы псевдослучайных чисел, полученных с помощью рекуррентных соотношений [12]. Поскольку программа псевдослучайных чисел (ПСЧ), распределенных по нормальному закону распределения, строится на основании подпрограмм ПСЧ, распределенных по равномерному закону, то для сокращения ячеек памяти МОЗУ вместо двух самостоятельных подпрограмм используется одна (первая). В ней предусматривается дополнительная пересылка ПСЧ в блок вариации исходных данных. Однако в блоке вариации необходимо использовать псевдослучайные числа, распределенные по равномерному закону в интервале $[1,1]$. В общем случае переход от интервала $[0,1]$ к интервалу $[a, b]$ производится по формуле

$$\eta = \xi (b - a) + a, \quad (1)$$

где ξ — ПСЧ, распределенные по равномерному закону в интервале $[0,1]$.

Для интервала $[-1,1]$ формула примет вид

$$\eta = 2\xi - 1. \quad (2)$$

Вариация И. Д. с погрешностью, распределенной по нормальному закону, производится по формуле

$$x_i = x_{i\text{исх}} \left(1 + \xi_n \frac{\Delta x_i}{3\sigma} \right), \quad (3)$$

а с погрешностью, распределенной по равномерному закону, —

$$x_i = x_{i\text{исх}} (1 + \eta \Delta x_i), \quad (4)$$

где ξ_m — ПСЧ, распределенные по нормальному закону ($m = 0, \sigma = 1$); Δx_i — заданная величина погрешности, отн. ед.; i — текущий индекс.

В программу 1-13 вносятся небольшие изменения: программа вариации записывается на место, занимаемое ранее блоком автоматизации; предусматривается возможность вывода на печать токов ветвей межсистемных связей. Вариация И. Д. производится после их сортировки.

В процессе решения задачи выходные параметры накапливаются на МБ (каждый параметр записывается в свою секцию МБ). Для осуществления контроля решения предусматривается вывод результатов расчета (по желанию оператора) на печать. Блок-схема программы приведена на рис. 1. Оценку точности расчета каждого выходного пара-

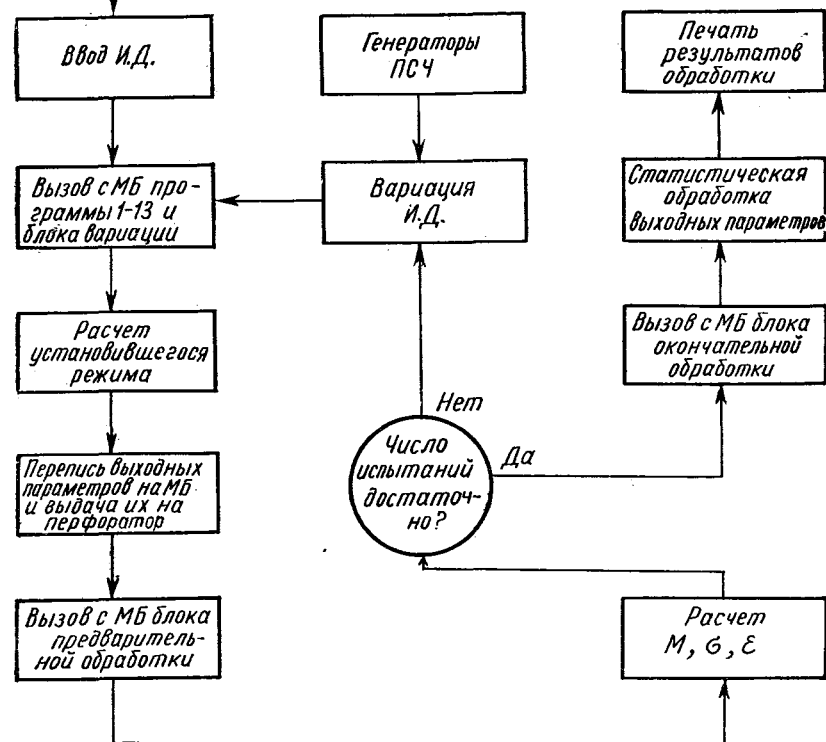


Рис. 1.

метра и необходимое число испытаний при этом предполагается проводить по методам, описанным в работах [6, 16]. Статистическая обработка результатов расчета предусматривается единой для всех выходных параметров. Следует отметить существенную трудность, которая возникает при обработке эмпирических распределений, отличных от стандартных. Обработка эмпирического распределения облегчается, если оно является симметричным. Статистическая обработка проводится в следующей последовательности.

1. Строятся эмпирические функции плотности и интегральные функции распределения.

2. Определяются мода M_0 и медиана M_e (выборочное среднее $\bar{x}$ и среднее квадратичное отклонение подсчитываются в ходе проверки достаточности числа испытаний).

3. Проверяется условие

$$\bar{x} - M_0 = 3(\bar{x} - M_e). \quad (5)$$

Если оно выполняется, то полученное распределение унимодальное симметричное (или незначительно от него отличающееся). В случае невыполнения условия (5) мера асимметрии оценивается с помощью предложенного К. Пирсоном коэффициента

$$S = \frac{\bar{x} - M_0}{\sigma}. \quad (6)$$

4. Определяются простые показатели эмпирического распределения:

а) амплитуда или размах вариаций

$$R = x_{\max} - x_{\min};$$

б) середина или центр размаха

$$d = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2};$$

в) предельные абсолютные

$$\Delta_{\max} = x_{\max} - \bar{x}, \quad \Delta_{\min} = x_{\min} - \bar{x}$$

и относительные отклонения

$$\delta_{\max} = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{\bar{x}}, \quad \delta_{\min} = \frac{x_{\min} - \bar{x}}{\bar{x}};$$

г) коэффициент вариации

$$W = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

5. Производится подбор эмпирического распределения, который является наиболее трудоемким при статистической обработке результатов расчета. В настоящее время существует множество методов, с помощью которых осуществляется эта процедура. Наиболее общими из них являются: применение распределения Джонсона или Пирсона, разложение в ряд Грема — Шарлье, разложение в ряд Эджворта и т. д. [9]. Наиболее удобным, на наш взгляд, является применение распределений Джонсона [14]. Практический интерес представляет определение корреляционной связи между двумя выходными параметрами $\Sigma \Delta P$ и $\Sigma \Delta Q$. Мету тесноты этой связи определяем с помощью коэффициента корреляции

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}, \quad (7)$$

где

$$x = \Sigma \Delta P, \quad y = \Sigma \Delta Q.$$

Блок вариации И. Д. установившегося режима может использоваться как самостоятельно (при анализе установившихся электрических режимов), так и для комплексной задачи оценки влияния погрешности исходной информации на результаты расчетов статической устойчивости и более обоснованного выбора запасов устойчивости. В настоящее время детерминистически определяемый предел статической устойчивости энергосистем служит единственным критерием обеспеченности нормативного запаса [1]. Однако системные параметры, влияющие на величину предела статической устойчивости, содержат в себе случайные погрешности. Поэтому возникла необходимость оценки влияния этой погрешности на параметры предельного по условиям статической устойчивости режима. Уточнение предела статической устойчивости и более приближающаяся к реальным условиям оценка запаса устойчивости имеют большое значение для эксплуатации энергосистем и проектирования их развития. Для решения перечисленных вопросов была построена статистическая модель статической устойчивости. Эта модель состоит из следующих самостоятельных блоков:

1) вариации параметров (сети, режима, электрических машин и автоматических регуляторов); 2) расчета установившегося режима; 3) утяжеления режима; 4) расчета собственных (С) и взаимных (ВЗ) сопротивлений; 5) расчета критерия устойчивости; 6) статистической обработки результатов расчета.

Работа проводится в следующей последовательности. С помощью соответствующей программы по заданному виду утяжеления [15] с заранее фиксированным шагом осуществляется утяжеление режима. Для утяжеленных режимов проверяется устойчивость по критерию аperiodической статической устойчивости (знак свободного и предшествующего ему членов характеристического уравнения системы). Указанная процедура продолжается до получения первого неустойчивого режима, после чего проводятся альтернативные уточнения параметров предельного режима путем уменьшения (деления пополам) первоначально заданного шага утяжеления. Для обеспечения необходимой гарантии безопасной работы энергосистемы действующими руководящими указаниями по статической устойчивости [1] предусматривается запас 20%-ного в нормальном и 8%-ного в кратковременном режимах предельного значения ее параметров. Эти нормативные величины приняты на основании практических соображений и опыта эксплуатации энергосистем и вызваны трудностью учета большого числа случайных факторов, обуславливающих погрешность исходных данных.

Описываемая статистическая модель позволяет уточнить предельные параметры режима и с большим основанием принять величину запаса. В блоке вариации параметров производится вариация параметров сети и режима по принятому закону распределения (нормальному или равномерному) в заданном диапазоне изменения их погрешностей. После этого рассчитываются установившийся режим, собственные и взаимные сопротивления генерирующих узлов. Далее производится вариация параметров генераторов и регуляторов возбуждения. Погрешность параметров электрических машин и регуляторов возбуждения может быть обусловлена следующими видами погрешностей: 1) методом определения; 2) эквивалентированием; 3) заменой действительных параметров типовыми.

В энергосистемах часто нет данных, которые позволили бы количественно оценить влияние каждого вида погрешности на ее результирующую величину. Трудность усугубляется тем, что и сами составляющие суммарной погрешности не могут быть определены однозначно и в каждом конкретном случае должны задаваться диапазоном изменения и вероятностным законом распределения. Поэтому в случае отсутствия информации о величинах погрешностей параметров электрических машин можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в работах [3, 4].

После вариации параметров генераторов и регуляторов возбуждения по критерию устойчивости рассчитываются коэффициенты характеристического уравнения a_0 и a_1 . Оценку достаточности числа испытаний целесообразно проверять по точности вычисления генеральных средних выходных параметров a_0 и a_1 в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [6, 16]. При проведении серии независимых испытаний могут возникнуть два варианта.

1. Из N проведенных испытаний в m случаях возникает нарушение устойчивости. Тогда отношение $\frac{m}{N}$ определит вероятность нарушения устойчивости при работе в данном утяжеленном режиме.

2. Ни одно из испытаний не приводит к нарушению устойчивости. В этом случае можно получить предел статической устойчивости с точностью до последнего шага утяжеления. Поскольку расчеты установившегося режима при полном объеме исходных данных требуют большого количества машинного времени, то целесообразно предварительно оценить отдельно чувствительность коэффициентов a_0 и a_1 к вариации параметров: режима и сети; электрических машин; регуляторов возбуждения. Если влияние

параметров сети и режима будет несущественным (по сравнению с другими), то это в значительной мере сократит затраты машинного времени. Перед началом расчета необходимо записать на МЛ комплекс программ расчета

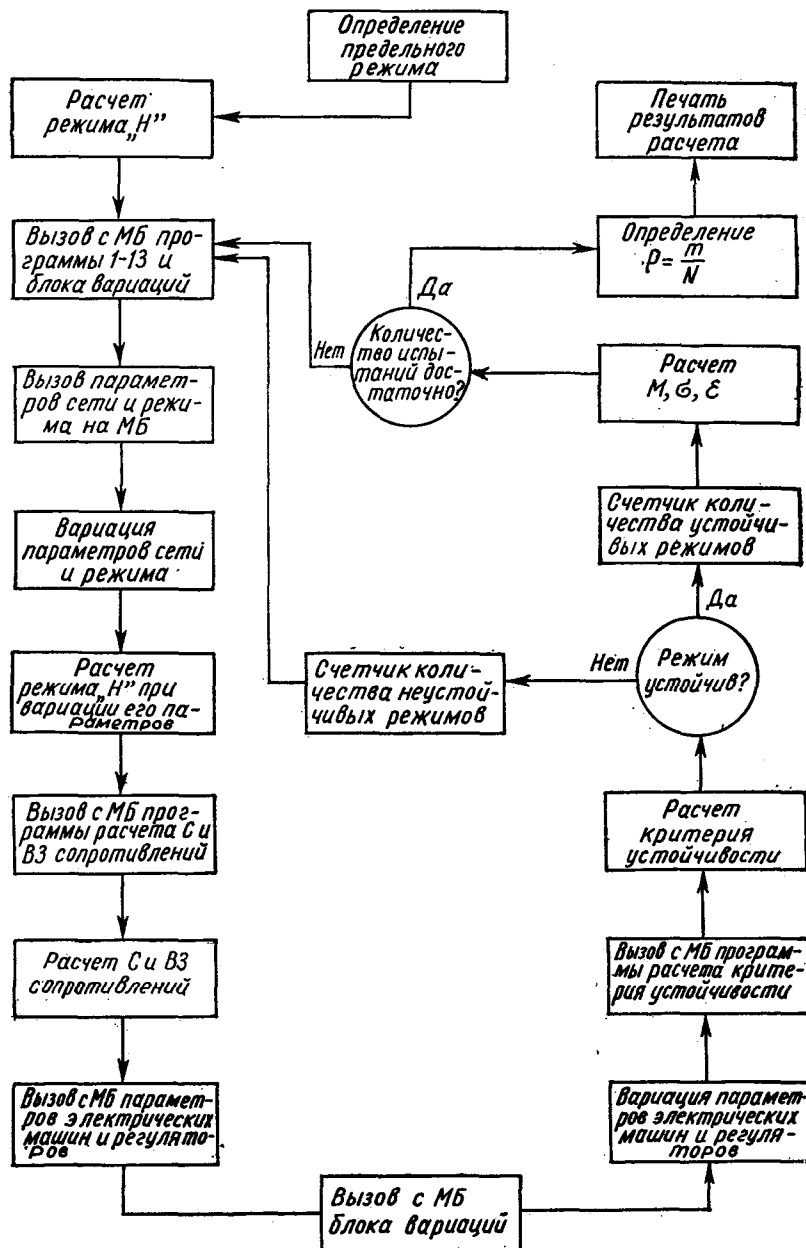


Рис. 2.

статической устойчивости (и в дальнейшем обращаться к ней), а программу вариации исходных данных и обработку результатов расчета записать на МБ.

Блок-схема программы по второй статистической модели приведена на рис. 2. Программа по первой статистической модели составляется совместно с СВТ РЭУ Донбассэнерго. Проведение практических расчетов и накопление достаточной статистики позволят конкретизировать процедуру статистической обработки выходных параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Азарьев Д. И. и др. Основные положения по определению устойчивости энергетических систем.— *Электричество*, 1963, 11.
2. Веников В. А. и др. Некоторые способы оценки погрешностей решения задачи оптимального распределения мощностей в энергетической системе.— *Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт*, 1970, 1.
3. Веников В. А., Кулиев А. М. Статистический анализ динамической устойчивости электрических систем.— *Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт*, 1969, 6.
4. Веретенников Л. П. и др. Об исходной информации для моделирования и расчетов процессов автономных электроэнергетических систем.— В кн.: Доклады V межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию, МЭИ, М., 1968.
5. Дерзкий В. Г., Левченко А. В.— Анализ влияния отклонения расчетных параметров от действительных значений при расчете на ЦВМ установившегося электрического режима энергосистемы.— В кн.: Применение вычислительных машин для анализа устойчивости и токов короткого замыкания в электрических системах. «Наукова думка», К., 1968.
6. Дерзкий В. Г., Цукерник Л. В. Применение метода статистических испытаний для анализа влияния упрощений методики расчета и неточности исходной информации при расчете на ЦВМ динамической устойчивости энергосистем.— В кн.: Анализ режимов электроэнергетических систем при помощи вычислительных машин. «Наукова думка», К., 1968.
7. Заславская Т. Б. и др. Пределы вариаций электрических параметров симметричной линии электропередачи, 17. «Энергия», М., 1970.
8. Инструкция по эксплуатации трансформаторов. Госэнергоиздат, М., 1961.
9. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений. «Наука», М., 1966.
10. Куров Б. Н., Шаханов В. С. Чувствительность оптимального распределения нагрузок к погрешностям информации.— *Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт*, 1971, 1.
11. Левинштейн М. Л., Мельдорф М. В. Применение метода статистических испытаний к вероятностному анализу устойчивости энергетических систем.— В кн.: Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. «Энергия», М., 1969.
12. Ляшенко В. Ф. Программирование для цифровых вычислительных машин М-220, БЭСМ-3М, БЭСМ-4, М-20. «Советское радио», М., 1967.
13. Умедын В. В. и др. Расчет установившихся электрических режимов сложных энергосистем на ЭЦВМ М-220.— В кн.: Применение ЭВМ для решения задач оперативного и перспективного планирования режимов энергосистем. Лат. ИНТИ, Рига, 1970.
14. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. «Мир», М., 1969.
15. Цукерник Л. В., Коробчук К. В. Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости (при отсутствии самораскачивания) сложной энергосистемы.— В кн.: Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. «Энергия», М., 1969.
16. Черненко П. А. К вопросу об определении необходимого числа испытаний для оценки влияния погрешности исходных данных на результаты расчета режимов энергосистем с помощью метода Монте-Карло. См. статью в настоящем сборнике.

К. В. Коробчук, Л. В. Цукерник

(Институт электродинамики АН УССР)

Итерационный метод расчета установившегося электрического режима и собственных и взаимных сопротивлений при анализе статической устойчивости сложной энергосистемы

Вопросы расчетов статической устойчивости сложных энергосистем, определения пределов и запасов устойчивости тесно связаны с расчетами установившихся электрических режимов как в отношении точности и однозначности получения результатов в любых (устойчивых и неустойчивых) режимах работы энергосистемы [3], так и в отношении общих принципов объединения отдельных программ в единый комплекс расчетов [4]. Большое значение приобретают вопросы оптимального (по требуемому объему оперативной памяти и машинного времени счета) построения общего алгоритма и его составляющих. При расчете предела статической устойчивости методом последовательного утяжеления исходного установившегося режима [5]