УДК 621.31
DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-46-51

В. В. БАРСКОВ
А. В. БУБНОВ
А. Н. КИРИЧЕНКО

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Актуальность темы определяется необходимостью обеспечения достаточных запасов статической и динамической устойчивости в современных электроэнергетических системах (ЭЭС). Целью статьи является проведение сравнительного анализа косвенных методов оценки устойчивости ЭЭС и определение областей их эффективного использования для анализа устойчивости электроэнергетических систем, а также для оценки эффективности использования этих методов при выполнении задачи по выбору оптимальных настроек автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности применения методов корневого годографа для оценки устойчивости электроэнергетических систем, а также об универсальности матричного метода с использованием QR-алгоритма, который широко используется в практике расчета устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость; демпфирование; качество переходного процесса; корневые, интегральные и частотные методы; D-разбиение; QR-алгоритм.

Введение. В современных электроэнергетических системах (ЭЭС), в условиях роста электрических нагрузок, развития электрических сетей и ввода в эксплуатацию новых генерирующих мощностей, по-прежнему остро стоит вопрос обеспечения достаточных запасов статической и динамической устойчивости параллельной работы электростанций.

Устойчивость параллельной работы обеспечивается, прежде всего, выбором настроек автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов электростанций. Рационально выбранные настройки, таким образом, обеспечивают качественное демпфирование переходных процессов в электроэнергетических системах. Это выражается в том, что кривые переходного процесса получают существенный декремент затухания во времени. Таким образом, оценка демпферных свойств синхронных машин, оснащенных АРВ, выбор оптимальных настроек регуляторов, качество переходных процессов — это разные аспекты одной задачи, а именно задачи обеспечения устойчивости параллельной работы электроэнергетической системы.

Постановка задачи. Прямая оценка устойчивости ЭЭС путем оценки качества демпфирования переходного процесса, производимая непосредственно по кривым переходного процесса, сопряжена, как правило, с большими трудностями, вызванными необходимостью численного интегрирования системы дифференциальных уравнений высокого порядка. Несмотря на то, что в связи с высокими возможностями вычислительной техники прямые оценки демпферных свойств находят применение, основными методами оценки качества переходного процесса продолжают оставаться косвенные методы [1–12], классификация которых представлена на рис. 1.

Целью статьи является проведение сравнительного анализа косвенных методов оценки устойчивости ЭЭС и определение областей их эффективного использования для анализа устойчивости электроэнергетических систем.

Теория. Корневые методы основаны на связи между распределением полюсов и нулей передаточной функции и переходным процессом. Переходная характеристика x(t) системы может быть вычислена при помощи обратного преобразования Лапласа. Для системы при нулевых начальных условиях при единичном ступенчатом воздействии $g(t)=1(t)$.

Известно, что переходный процесс и распределение нулей и полюсов передаточной функции связаны друг с другом. На этой связи основаны корневые методы. Обратное преобразование Лапласа позволяет определить переходный процесс $x(t)$ рассматриваемой системы. Если система имеет нулевые начальные значения параметров, то при единичном ступенчатом возмущении $g(t)=1(t)$:

$$x(t)=L^{-1}\left[\frac{1}{p}W_{gx}(p)\right]=L^{-1}\frac{P(p)}{pD(p)}, \qquad (1)$$

Рис. 1. Косвенные методы анализа устойчивости ЭЭС

где $W_{gx}(p)$ — передаточная функция замкнутой системы, $\frac{1}{p}$ — изображение единичного ступенчатого возмущения $1(t)$.

Если $D(p)$ не имеет кратных корней, то

$$x(t)=\frac{P(0)}{D(0)}+\sum_{i=1}^{n}\frac{P(p_i)}{p_iD'(p_i)}ep_it\ , \qquad (2)$$

где p_i — корни характеристического полинома замкнутой системы, $P(p)=0$, $D'(p_i)=\frac{dD(p)}{dp}$ — первая производная характеристического полинома $D(p)$ по p при $p = p_i$.

Из (2) следует, что на характер переходного процесса влияют и числитель, и знаменатель передаточной функции замкнутой системы $W_{gx}(p)$. Если числитель $W_{gx}(p)$ не имеет нулей, то есть представляет собой постоянную величину, то характер переходных процессов можно оценивать по ее полюсам, то есть корням характеристического уравнения замкнутой системы.

Введем обозначения: $\frac{P(0)}{D(0)}=x(\infty)$, $\frac{P(p_i)}{p_iD'(p_i)}=C_i$.

Тогда выражение (2) запишется в виде:

$$x(t)=x(\infty)+\sum_{i=1}^{n}C_ie^{p_it}. \qquad (3)$$

Вынужденная составляющая переходного процесса $x(\infty)$ обусловлена законом изменения $g(t)$. Свободная составляющая переходного процесса $\sum_{i=1}^{n}C_ie^{p_it}$ определяется полюсами передаточной функции системы и не зависит от возмущающего воздействия.

Из приведенных выражений очевидна связь между переходным процессом и распределением полюсов и нулей. Рассмотрим методы, использующие эту связь для анализа переходных процессов в электроэнергетической системе.

По расположению полюсов и нулей передаточной функции представляется возможным приближенно оценить качество переходных процессов. Для этого можно использовать следующие положения:

1. Длительность переходного процесса в основном зависит от абсолютного значения действительной части ближайшего к мнимой оси полюса передаточной функции замкнутой системы при условии, что данный полюс не компенсирован нулем передаточной функции.

2. Уменьшение амплитуды колебательной составляющей, создаваемой комплексными полюсами, и приближение к асимптоте экспоненциальной составляющей, создаваемой вещественным полюсом, происходит тем быстрее, чем больше модуль вещественной части комплексного полюса или модуль вещественного полюса.

3. Перерегулирование переходной характеристики зависит от отношения мнимой части доминирующих комплексных полюсов к вещественной.

Траектории, описываемые на комплексной плоскости корнями характеристического уравнения замкнутой системы при плавном изменении одного из ее параметров от 0 до ∞, называют корневым годографом.

Основополагающими работами в разработке метода корневого годографа в нашей стране были работы К. Ф. Теодорчика и Г. А. Бендрикова, а в США — работы В. Р. Эванса [13].

Если характеристическое уравнение замкнутой системы может быть приведено к виду

$$B_n(p)\ +\ A\cdot B_m(p)=0, \qquad (4)$$

где $B_n(p)=a_0p^n\ +\ a_1p^{n-1}\ +\ a_n$; $B_m(p)=b_0p^m\ +\ b_1p^{m-1}+ +b_m$; $A>0$ — изменяемый параметр; $B_n(p)$ и $B_m(p)$ — полиномы, не имеющие кратных корней, тогда корневой годограф имеет следующие свойства, которые определяют его построение:

1. Начальными точками ветвей годографа, то есть корнями уравнения (4) при $A=0$, являются корни $\beta_1, \beta_2,..., \beta_n$ полинома $B_n(p)$.

2. С увеличением свободного параметра A корни уравнения плавно изменяются, образуя на комплексной плоскости n непрерывных линий — ветвей годографа.

3. Предельными точками ветвей годографа — корнями уравнения при $A=\infty$ являются корни $\gamma_1, \gamma_2,..., \gamma_m$ полинома $B_m(p)$.

4. В предельных точках заканчиваются только m ветвей годографа. Остальные $n-m$ ветвей уходят в бесконечность, асимптотически приближаясь к прямым, пересекающимся в точке на вещественной оси.

В. Р. Эванс [13] предложил геометрический метод построения траекторий корней, пригодный для систем, передаточная функция которых дана в виде простых множителей. Это, как правило, системы невысокого порядка, имеющие один варьируемый параметр.

Возможно и аналитическое построение годографа. Если корень характеристического уравнения (4) $p_i=c+j\omega$, то основное аналитическое уравнение траекторий корней может быть представлено в виде:

$$\left[B_n(p)-\frac{\omega^2}{2!}B_n''(p)+...\right]\times$$
$$\times\left[B_m'(p)-\frac{\omega^2}{3!}B_m'''(p)+...\right]-\left[B_n'(p)-\frac{\omega^2}{3!}B_n'''(p)+...\right]\times$$
$$\times\left[B_m(p)-\frac{\omega^2}{2!}B_m''(p)+...\right]=0\ , \qquad (5)$$

где $B_n'(p)=\left[\frac{dB_n(p)}{dp}\right]$; $B_n''(p)=\left[\frac{d^2B_n(p)}{dp^2}\right]$; $p=c$.

Уравнение (5) позволяет при выбранном значении c найти ординаты ω, при которых прямая с абсциссой c пересекает траектории корней характеристического уравнения (4).

Значение свободного параметра А определяют по формуле:

$$A = \frac{B'_n(p) - \frac{\omega^2}{3!}B'''_n(p) + \ldots}{B'_m(p) - \frac{\omega^2}{3!}B'''_m(p) + \ldots}, \quad (6)$$

при комплексных сопряженных корнях и по формуле

$$A \frac{-B_n(p)}{B_m(p)}$$

при действительном корне.

Корневой годограф позволяет исследовать влияние свободного параметра на устойчивость электроэнергетической системы и качество регулирования. Система устойчива при тех значениях свободного параметра, которым соответствует расположение корневого годографа в левой полуплоскости. Границу устойчивости определяют из условия попадания действительного корня в начало осей координат (апериодическая граница устойчивости) или пары комплексных корней на мнимую ось (колебательная граница устойчивости).

Корневой годограф позволяет также определить показатели качества переходной характеристики для выбранных значений свободного параметра по аналитическому выражению этой характеристики.

Однако, несмотря на свою наглядность, метод корневого годографа практически не применяется для анализа сложных систем. Объясняется это тем, что геометрический метод построения траекторий корней недостаточно точен и, кроме того, требует, чтобы передаточная функция была задана в виде простых множителей.

Более широкое распространение получил другой корневой метод — оценка по степени устойчивости [14, 15]. В этом методе рассматривается только составляющая свободного движения уравнения (3). Переходная функция записывается в виде:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i e^{p_i t} . \quad (7)$$

Для устойчивой системы корни p_i имеют отрицательные вещественные части и решение (7) дает затухающий процесс. Длительность затухания составляющей переходного процесса каждого из корней определяется удаленностью вещественной части корня от мнимой оси. Самой длительной будет составляющая от корня с минимальной величиной вещественной части. Эта составляющая и будет определять длительность переходного процесса в целом.

Понятие степени устойчивости введено Я. З. Цыпкиным и П. В. Бромбергом. Абсолютное значение вещественной части ближайшего к мнимой оси корня $|\alpha|\min$ и есть степень устойчивости. Оценка длительности процесса при этом может быть произведена по следующему выражению:

$$t \approx \frac{3}{|\alpha|\min} . \quad (8)$$

Степень устойчивости определяется решением так называемого смешанного однородного характеристического уравнения системы.

По методу D-разбиения, предложенному Ю. И. Неймарком, в плоскости каких-либо двух коэффициентов, задается начальное значение α, шаг по α и далее при изменении частоты от начального до конечного значения в плоскости коэффициентов строятся линии равной степени устойчивости.

Таким образом, расчет степени устойчивости является удобным и простым. Наглядно рисуется геометрическая картина расположения корней на плоскости коэффициентов регулирования. Однако этот критерий не учитывает влияния вынужденной составляющей, определяемой возмущающим воздействием, не учитывает также влияние нулей передаточной функции.

В развитии частотных методов оценки качества демпфирования переходных процессов значительная роль принадлежит В. В. Солодовникову. В его работах была доказана возможность применения частотных методов для определения таких важных показателей качества, как быстродействие, перерегулирование, колебательность процесса [16, 17].

Возможность использования этих методов основана на зависимости между переходной характеристикой и частотными характеристиками системы.

Если на линейную систему воздействует гармонический сигнал, то и установившееся значение выходной величины будет гармоническим:

$$X(j\omega) = W_{gx}(j\omega)G(j\omega), \quad (9)$$

где $X(j\omega)$ — изображение выходной величины $x(t)$ по Фурье, $G(j\omega)$ — изображение входной величины $g(t)$ по Фурье, $W_{gx}(j\omega)$ — комплексный коэффициент усиления замкнутой системы.

При воздействии на систему единичной ступенчатой функции $g(t) = 1(t)$ выходная величина, являющаяся переходной характеристикой системы $h(t)$, определяется через вещественную частотную или мнимую частотную характеристику замкнутой системы

$$x(t) = h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega, \quad (10)$$

где $P(\omega)$ — вещественная частотная характеристика замкнутой системы.

$$x(t) = h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos\omega t d\omega + p(0), \quad (11)$$

где $Q(\omega)$ — мнимая частотная характеристика замкнутой системы.

Если на систему действует произвольное возмущение, то переходный процесс определяется по обобщенным вещественной и мнимой характеристикам:

$$P_{об}(\omega) = \mathrm{Re}\left[W_{gx}(j\omega)G(j\omega)\right], \quad (12)$$

$$Q_{об}(\omega) = \mathrm{Im}\left[W_{gx}(j\omega)G(j\omega)\right],$$

где $G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-j\omega t}dt$ — изображение входного воздействия $g(t)$ по Фурье.

Таким образом, выражения (10), (11), связывающие переходную характеристику с вещественной и мнимой частотными характеристиками, позволяют использовать последние для анализа устойчивости ЭЭС и качества переходного процесса.

Точное определение переходной характеристики по (10) и (11) достаточно сложно, но аппроксимацией вещественной и мнимой частотных характеристик линейно-кусочными функциями можно получить достаточно удобные выражения для приближенного построения переходной характеристики.

Для косвенного анализа качества переходных процессов используются известные свойства частотных характеристик и соответствующих им переходных процессов.

Для линейных систем, структура которых представима последовательно соединенными звеньями, используются логарифмические частотные характеристики. Если система имеет параллельно соединенные звенья, задача нахождения логарифмов сумм или разностей по заданным логарифмам слагаемых для комплексных чисел становится очень трудоемкой. Поэтому применение логарифмических частотных характеристик для электроэнергетических систем, даже простейших, является нецелесообразным.

Перейдем к оцениванию качества переходных процессов с использованием интегральных квадратичных критериев. Как известно, второй, или прямой, метод Ляпунова позволяет исследовать устойчивость решений нелинейных дифференциальных уравнений, не производя решений самих уравнений.

Будем рассматривать систему дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dx}{dt} = f(x), \qquad (13)$$

где $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$, $f(x) = \begin{matrix} f_1(x_1, \dots x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots x_n) \end{matrix}$.

Пусть функция $V(x)$ является квадратичной формой, то есть

$$V(x) = \sum_{i,j=1}^{n} a_{ij} x_i x_j,$$

где $x_i = x_i(t)$, $x_j = x_j(t)$ — отклонения координат линейной системы, $a_{ij} = a_{ji}$ — весовые коэффициенты.

Если при этом $V(x)$ является определенно положительной, то есть в соответствии с критерием Сильвестера, все главные диагональные миноры ее матрицы строго положительны, а ее производная в силу системы (13) является отрицательно определенной или знакоотрицательной, то $V(x)$ является функцией Ляпунова. Из теорем Ляпунова об устойчивости (асимптотической устойчивости) следует, что если для системы уравнений (13) существует положительно определенная функция $V(x)$, производная которой в силу системы (13) знакоотрицательна (отрицательно определенна), то тривиальное решение $x(t) \equiv 0$ системы (13) устойчиво (асимптотически устойчиво) по Ляпунову [18].

Следует отметить, что построение функций Ляпунова является сложной задачей, решение которой в значительной степени зависит от интуиции.

Для электроэнергетической системы предлагается воспринимать метод функций Ляпунова не как математический аппарат, а как практический прием, используя который (пусть приближенно) можно облегчить решение ряда практических задач. При этом основная роль при выборе функций отводится физическим соображениям, связанным с учетом специфики исследуемой системы.

В работах Зеккеля А. С. предлагается конструирование функции Ляпунова с помощью интеграла энергии уравнений возмущенного движения консервативной идеализации электроэнергетической системы.

Как известно, для консервативной модели системы управления возмущенного движения допускают запись выражения интеграла энергии:

$$K + \Pi = V = \text{const},$$

где K, Π — кинетическая и потенциальная энергия системы. При этом K является положительно-определенной формой скоростей, а Π — положительно-определенной формой обобщенных координат системы. Это значит, что V является положительно-определенной формой обобщенных координат и скоростей системы и удовлетворяет условию $\frac{dV}{dt} = 0$, то есть V есть функция Ляпунова.

Таким образом, если с помощью энергетического интеграла можно построить для консервативной модели функцию Ляпунова, то, использовав ее в качестве подинтегральной функции, можно проводить анализ качества демпфирования переходных процессов, то есть устойчивости работы ЭЭС. Для этого надо в области устойчивости находить минимум интеграла

$$I_V = \int_0^{\infty} V dt. \qquad (15)$$

Очевидно, что сочетание коэффициентов регулирования, обеспечивающее минимум этого интеграла, обеспечит хорошее качество переходных процессов.

Физический смысл интеграла (15) — это энергия, которую должны затратить диссипативные силы и управляющее воздействие, чтобы перевести систему в заданное положение равновесия.

Рассмотрим методы оценки демпферных свойств электроэнергетических систем, получившие наибольшее развитие.

Начиная с середины 50-х годов по настоящее время активно ведутся разработки алгоритмов и программ расчета колебательной устойчивости, базирующиеся на методе D-разбиения в плоскости двух параметров. Эти программы длительное время использовались для широкого круга вопросов, связанных с сильным регулированием возбуждения генераторов станций, работающих через протяженные линии электропередачи. При этом анализировалась эффективность различных режимных параметров стабилизации, осуществлялся синтез оптимальной настройки АРВ, определялись области устойчивости при вариации режимов работы электропередачи. Этот же подход в основном сохранялся и при исследовании сильного регулирования возбуждения на одной из станций системы достаточно сложной структуры.

Следует отметить, что основным вопросом, стимулировавшим развитие метода D-разбиения, не являлось оценивание демпферных свойств системы как таковое. Эта задача решалась попутно, основным являлось решение задач выбора настроек АРВ, в том числе для совокупности режимов энергосистем.

На этапе развития ЭЭС, когда сильное регулирование возбуждения становится преобладающим, возникла задача взаимной координации настроек АРВ сильного действия генераторов нескольких электростанций. Кроме этого, поднимался вопрос выбора станций, на которых целесообразно использование регуляторов сильного действия. В этих условиях использование метода D-разбиения, в частности для постанционной оптимизации демпферных свойств энергосистемы, достаточно удобного и хорошо зарекомендовавшего себя в условиях простых схем, для сложных электроэнергетических структур оказалось малоэффективным.

В последнее время для анализа демпферных свойств все большее применение находят матричные методы, основанные на определении собственных значений матриц коэффициентов линеаризованных дифференциальных уравнений. Расчет собственных значений ориентирован на анализ демпферных свойств системы, в то время как метод D-разбиения, например, позволяет, кроме этого, целенаправленно выбрать коэффициенты усиления каналов стабилизации различных регулирующих устройств, в том числе и АРВ генераторов, и тем самым активно воздействовать на качество переходных процессов.

Тем не менее имеются большие перспективы применения матричных методов в сочетании с процедурами численного поиска для расчетных исследований статической устойчивости сложных энергосистем и на возможность формализации определения оптимальных настроечных параметров АРВ на этой основе.

Следует обратить внимание и на тот факт, что наиболее эффективным средством решения собственных значений и в настоящее время является QR-алгоритм. Универсальность QR-алгоритма, высокая точность и скорость вычислений, численная устойчивость обусловили тот факт, что он является в настоящее время практически единственным активно использующимся средством для анализа устойчивости электроэнергетических систем матричными методами в практике как российских, так и зарубежных исследователей.

Большой опыт расчетов устойчивости ЭЭС с помощью матричных методов накоплен в нашей стране. Эти исследования позволили оценить состояние колебательной устойчивости в ряде реальных сложных схем энергообъединений, а также оценить демпфирование переходных процессов при различных законах регулирования и настройках каналов стабилизации АРВ.

Проведенный сравнительный анализ методов оценки устойчивости ЭЭС позволяет сделать следующие выводы.

Заключение.

1. Метод корневого годографа имеет перспективы для оценки устойчивости электростанции малой мощности, для которой вся ЭЭС может рассматриваться как шины бесконечной мощности. Этот метод имеет большое преимущество — наглядность.

2. При анализе устойчивости и демпферных свойств сложных ЭЭС, среди корневых методов, наиболее универсальным, активно используемым и, по сути, единственным в настоящее время продолжает оставаться QR-алгоритм для определения собственных значений матриц коэффициентов линеаризованных дифференциальных уравнений.

3. Метод D-разбиения целесообразно использовать для расчета колебательной устойчивости, и выбора настроек АРВ, но в сложных ЭЭС он малоэффективен. По сути, этот метод хорошо работает только в случае схемы «станция конечной мощности — шины бесконечной мощности». В случае двух станций использование этого метода для выбора настроек регуляторов возможно, но требует проверки выбранных настроек другим методом, например, с применением QR-алгоритма. В случае большего числа станций оптимизация демпферных свойств ЭЭС может быть достигнута путем оптимизации демпферных свойств каждой станции в отдельности, то есть постанционно.

4. Применение логарифмических частотных характеристик для оценки устойчивости ЭЭС нецелесообразно даже для простейших ЭЭС.

5. Для анализа устойчивости и качества демпфирования переходных процессов представляет интерес конструирование функции Ляпунова с помощью интеграла энергии консервативной модели.

Библиографический список

1. Watkins D. S. Understanding the QR algorithm // SIAM Review. 1982. Vol. 24 (4). P. 427–440. DOI: 10.1137/1024100.

2. Nugraha A. S., Basaruddin T. Analysis and comparison of QR decomposition algorithm in some types of matrix // IEEE 2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 9–12 September, Poland. Wroclaw, 2012. P. 561–565.

3. Snopce H., Azir A. S. Systolic Approach for QR Decomposition // Computational Problems in Science and Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Cham, 2015. Vol. 343. P. 415–423. DOI: 10.1007/978-3-319-15765-8_25.

4. Feng T., Liu H. The computer realization of the qr decomposition on matrices with full column rank // 2009 International Conference on Computational Intelligence and Security, CIS 2009, Beijing, China. 2009. Vol. 2. P. 76–79. DOI: 10.1109/CIS.2009.54.

5. Fukaya T., Nakatsukasa Y., Yanagisawa Y. [et al.]. CholeskyQR2: a simple and communication-avoiding algorithm for computing a tall-skinny QR factorization on a large-scale parallel system // 2014 5th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems. 2014. P. 31–38. DOI: 10.1109/ScalA.2014.11.

6. Xiuyan Z., Min Z., Qingfeng Z. [et al.]. Comparison of V-BLAST/OSIC algorithm and the QR decomposition algorithm // 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013). 2013. Vol. 2. P. 1158–1162.

7. Mohanty S. K., Gopalan S. I/O efficient QR and QZ algorithms // IEEE In High Performance Computing (HiPC), 2012 19th International Conf. 2012. P. 1–9. DOI: 10.1109/HiPC.2012.6507492.

8. Zhou K. X., Roumeliotis S. I. A sparsity-aware QR decomposition algorithm for efficient cooperative localization // IEEE In Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference. 2012. P. 799–806.

9. Qu J., Cui Y., Wang X. [et al.]. Computer simulation of QR Algorithm and its application in the matrix Eigenvalue problem // IEEE InTest and Measurement, 2009. ICTM'09. International Conference. 2009. Vol. 1. P. 338–341. DOI: 10.1109/ICTM.2009.5412924.

10. Sayed A. H. QR and Inverse QR Algorithms // Adaptive Filters. 2008. P. 580–592. DOI: 10.1002/9780470374122.ch52.

11. Karmarkar J. S., Thaler G. J. Generalisation of parameter methods and D decomposition // In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1970. Vol. 117, no. 10. P. 2030–2032.

12. Gross G., Jmparato C. F., Look P. M. A Tool for the Comprehensive Analysis of Power System Dynamic Stability // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982. Vol. PAS-107, Issue 1. P. 226–234. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317342.

13. Evans W. R. Control system syntheses by Root Locus method // Electrical Engineering. 1950. Vol. 69. DOI: 10.1109/T-AIEE.1950.506012.

14. Фельдбаум А. А. О распределении корней характеристического уравнения систем регулирования // Автоматика и телемеханика. 1948. № 4. С. 253–279.

15. Ципкин Я. З., Бромберг П. В. О степени устойчивости линейных систем. Б. м.: Б. и., 1945. С. 1163–1168.

16. Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М.: Физматгиз, 1960. 656 с.

17. Теория автоматического регулирования. В 4 кн. Кн. 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 768 с.

18. Чемоданов Б. К. Математические основы теории автоматического регулирования. В 2 т. М.: Высшая школа, 1977. Т. 1. 366 с.

БАРСКОВ Владислав Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника».
SPIN-код: 2404-5109
AuthorID (РИНЦ): 684433
AuthorID (SCOPUS): 57212030132
Адрес для переписки: vlad.barskov@bk.ru

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника».
SPIN-код: 5358-0661
ORCID: 0000-0002-0604-3795
AuthorID (SCOPUS): 7004195241
ResearcherID: A-6669-2015
Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

КИРИЧЕНКО Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника».
SPIN-код: 3213-3796
AuthorID (РИНЦ): 342441
AuthorID (SCOPUS): 56503266800
ResearcherID: D-7259-2019
Адрес для переписки: alexandrkirichenko@yandex.ru

Для цитирования

Барсков В. В., Бубнов А. В., Кириченко А. Н. Особенности практического применения методов оценки устойчивости электроэнергетической системы // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 46–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-46-51.

Статья поступила в редакцию 11.11.2020 г.