

Статистические характеристики частоты электроэнергетической системы, связанной слабой связью с энергообъединением

РАБИНОВИЧ М.А.

Рассматриваются статистические характеристики частоты электроэнергетической системы (ЭЭС), связанной слабой связью с энергообъединением в условиях случайных колебаний нагрузки в узлах сети. Представлен случай, когда малая ЭЭС подключена к энергообъединению связью, функционирующей в режиме, близком к предельному, что приводит к возникновению кратковременных асинхронных режимов под воздействием случайных колебаний нагрузки, кратковременных КЗ и других возмущений. Рассматриваются среднее число нарушений и восстановлений синхронизма, характеристики скачков частоты и фазы меньшей ЭЭС и другие параметры в зависимости от тяжести режима и направления перетока активной мощности. Представлена переключаемая модель случайных колебаний частоты малой ЭЭС в нормальных и предельных режимах. Скачки частоты и фазы меньшей ЭЭС могут служить индикатором близости системы к предельному (аварийному) режиму. Отмечается аналогия в процессах поведения фазы и частоты в системах связи с частотной модуляцией и электроэнергетических системах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетическая система, частота, помеха, ошибка измерений, спектральная плотность, скачки фазы

На практике встречаются случаи, когда при срабатывании систем противоаварийной автоматики (например, АЛАР) отключаются не все воздушные линии (ВЛ), входящие в сечение. При этом полного отключения аварийной ЭЭС не происходит и может возникнуть устойчивый асинхронный режим. При этом возможен также случайно возникающий асинхронный режим, а также его самовосстановление вследствие изменения фазы из-за колебаний активной нагрузки в подключенной ЭЭС.

Другой возможный случай возникновения асинхронных режимов и самовосстановления нормального режима наблюдается при режимах, близких к предельным по передаваемой активной мощности. В этих случаях колебания нагрузки подключенной ЭЭС также могут вызвать возникновение и самовосстановление асинхронных режимов. Для определенности будем считать слабой такую связь, которая работает в режиме, близком к предельному по передаваемой мощности. Подобная ситуация возникает также при кратковременных КЗ с нарушением предельно допустимых режимов по межсистемной ВЛ.

Режимы межсистемных связей, близкие к предельным, максимально используют пропускную способность межсистемной связи и в ряде случаев являются предпочтительными. Однако в этих случаях повышается вероятность нарушения устойчивости энергообъединения с нарушением синхронизма из-за случайных колебаний нагрузки. Изучение вероятностных характеристик предельных ре-

жимов в этих условиях представляет практически важную задачу оперативного управления.

Далее рассматриваются случайные колебания активной нагрузки ЭЭС, подключенной слабой связью к энергообъединению, которые приводят к колебаниям ее частоты, фазы и уровня напряжения. В нормальном режиме обычно не возникают переходы фазы малой ЭЭС на $\pm 2\pi$ относительно фазы основной части энергообъединения. Точнее, такие переходы маловероятны. Однако при больших колебаниях нагрузки в режимах, близких к предельным, возможен обход результирующего вектора напряжения на векторной диаграмме рис. 1,а вокруг начала координат с изменением результирующей фазы малой ЭЭС на $\pm 2\pi$. Такие переходы по аналогии с каналами связи будем называть скачками фазы на $\pm 2\pi$. Результаты моделирования этих процессов, представленные далее, получены на динамической модели энергообъединения из двух ЭЭС. Рассмотрим подобие и отличие поведения узкополосного случайного процесса в энергообъединении из двух ЭЭС и в канале связи с частотной модуляцией.

В статье рассматривается физическая картина возникновения скачков фазы на $\pm 2\pi$ с точки зрения колебаний фазы вектора напряжения под воздействием колебаний нагрузки в малой ЭЭС, подключенной к энергообъединению. Задача сводится к анализу случайного процесса [1, 2]:

$$\xi(t) = Q(t)\cos\omega_0 t + \Phi(t) + n(t) = R(t)\cos(\omega_0 t + \Phi(t) + \Psi(t)), \quad (1)$$

где Q – амплитуда модулированного по частоте сигнала; $\Phi(t)$ – передаваемое сообщение при модуляции сигнала по фазе; $\Phi'(t)$ – отклонение частоты от номинального значения; $R(t)$ – огибающая; $\Psi(t)$ – фазовая ошибка процесса $\xi(t)$.

При рассмотрении канала связи с частотной модуляцией $n(t)$ – обычно помеха с нормальным распределением, а при анализе процессов поведения частоты в энергообъединении – это колебания, вызванные случайными изменениями нагрузки.

В этом представлении $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая круговая частота процесса $\xi(t)$, а $\Phi'(t)$ в рассматриваемых случаях представляет отклонение частоты от номинального значения (50 Гц). В электроэнергетике это обычно частота переменного тока, а в радиотехнике и теории связи – частота сигнала в канале связи. При этом изучение поведения быстрого процесса $\xi(t)$ можно заменить изучением медленных значений огибающей $R(t)$ и фазовой ошибки $\Psi(t)$ (что можно выполнить значительно проще).

Выражением (1) можно представить практически любой сигнал в электротехнике и радиотехнике. Известным свойством такого представления сигналов является то, что их огибающая $R(t)$ и фаза $\Psi(t)$ оказываются медленными по сравнению с ω_0 функциями. Что касается произвольных сигналов (например, при коммутациях в сети), то выражение (1) справедливо и для них, однако эти огибающая и фаза могут быть произвольными функциями (а не только медленными).

Векторная диаграмма (рис. 1,а) и фазовая траектория (рис. 1,б) представлены для общего случая отклонения полной фазы $\omega_0 t + \Psi(t)$ процесса от нулевого значения (при частоте 50 Гц).

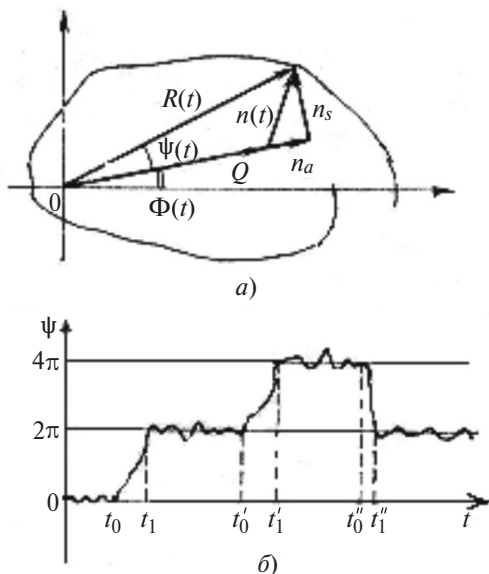


Рис. 1. Векторная диаграмма (а) и фазовая траектория (б) узкополосного случайного процесса

В том случае, когда отклонение частоты процесса ω отлично от номинального значения ω_0 , частота (как производная полной фазы в (1)) будет $\omega = \omega_0 + \Psi'(t)$. Далее рассматривается случай постоянного отклонения частоты ω от номинального значения ω_0 , которое формируется при возникновении небаланса активной мощности в энергообъединении. Особый интерес представляют режимы перетока активной мощности, близкие к предельному значению, которые наиболее благоприятны для возникновения кратковременных нарушений синхронизма рассматриваемого энергообъединения.

Важный для электроэнергетики класс случайных процессов (1) представляет собой сумму синусоидального сигнала и стационарного случайного шума с нормальным распределением и заданной спектральной плотностью. По существу, все непосредственные измерения тока, напряжения и частоты в сети относятся к этому классу процессов. Частота этих процессов меняется во времени, что приводит к определенной полосе частот этих процессов в спектральной области. Такие процессы, у которых полоса частот значительно меньше частоты синусоидального процесса, обычно называют узкополосными. Их свойства традиционно используют в задачах релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА), измерительной техники, системах первичного и вторичного регулирования частоты и мощности в энергообъединениях, системах передачи информации и т.д.

Реальные процессы в оборудовании также представлены узкополосными случайными процессами (кроме быстрых процессов в коммутационных аппаратах). Этим определяется постоянный интерес к изучению свойств синусоидального сигнала на фоне аддитивного шума.

Отметим, что узкополосный процесс при измерении частоты формируется не только за счет помех измерения, но и за счет естественных флуктуаций нагрузки и генерации в узлах сети, а также переключений коммутационных аппаратов. Все эти возмущения режима вызывают малые отклонения частоты. Отделить влияние режимных флуктуаций частоты от шума измерений достаточно сложно, но в рассматриваемой задаче и не нужно. И те и другие виды искажений приводят к ошибкам в измерениях частоты. В сложной физической системе, каким является энергообъединение, с множеством источников синусоидальных процессов и множеством помех, колебания частоты в узлах сети формируются как результат взаимодействия их всех.

Узкополосные процессы имеют ясную физическую природу. Измерениям параметров синусоидального процесса обычно предшествует его

фильтрация узкополосным фильтром, для того чтобы минимизировать действия помехи. Узкополосный фильтр убирает те спектральные компоненты суммы синусоидального процесса и помехи, которые лежат вне полосы пропускания входного фильтра.

Из векторной диаграммы рис. 1,а следует, что интенсивность случайных колебаний частоты ω существенно зависит от соотношения интенсивности колебаний нагрузки и вектора разности напряжений на концах ВЛ с амплитудой Q . В большинстве случаев колебания частоты ω и фазовой ошибки $\Psi(t)$ малы, поскольку вектор $R(t)\cos(\omega_0 t + \Phi(t) + \Psi(t))$ находится в области, близкой к $\Psi(t)=0$. Однако возможны случаи больших отклонений фазы $\Psi(t)$ и, в частности, обход результирующего вектора вокруг начала координат 0. При этом происходит временная потеря синхронизма в рассматриваемом энергообъединении. Именно эти случаи представляют интерес. В процессе таких переходов фаза результирующего вектора на рис. 1,а изменяется на $\pm 2\pi$.

Далее рассмотрим среднее число таких переходов в единицу времени N , спектральную плотность мощности колебаний частоты на этих интервалах времени, а также их распределение по длительности. Первый параметр характеризует вероятность нарушения синхронизма для объединения системы из ЭЭС, подключенной слабой связью к шинам энергообъединения (включая шины с бесконечной мощностью). Под слабой понимается межсистемная связь, функционирующая в предельном по пропускной способности режиме. Слабая связь имеет принципиальное значение, поскольку только в этих условиях за счет случайных колебаний нагрузки легко достигается предельный режим передаваемой мощности и могут возникнуть условия для скачка фазы на $\pm 2\pi$.

Изучением статистических характеристик частоты узкополосных процессов в радиотехнике занимаются давно [4–7, 9] и успешно, а аналогичным процессам в задачах электроэнергетики уделяют недостаточно внимания, хотя и те и другие имеют подобные характеристики, поскольку подчиняются одним и тем же законам физики. Это, главным образом, спектральные свойства колебаний частоты суммы синусоидального процесса и гауссова шума, среднее число аномальных выбросов частоты и распределение их по длительности. Эта задача решена для номинального значения частоты в меньшей из ЭЭС. Обобщение этих вопросов, а также расширение результатов [1, 2] на спектральную плотность процессов с ненормальной частотой являются целью этой статьи. Оконча-

тельные результаты представлены в виде графиков, найденных методами численного интегрирования.

Необходимо отметить, что указанные вопросы имеют не только чисто научное (познавательное), но и большое практическое значение при ведении режимов, в системах связи и т.д. В большинстве прикладных задач достаточно анализировать простую (переключательную) модель случайных колебаний частоты. Например, в задаче анализа помехоустойчивости канала связи с частотной модуляцией (ЧМ) достаточно рассматривать нормальные (гауссовы) и аномальные (импульсные) помехи. При анализе режимов энергообъединений поведение импульсной компоненты частоты служит индикатором близости режима к предельному по пропускной способности межсистемной связи.

Сравним далее статистические характеристики частоты простой (переключательной) и точной модели спектральной плотности колебаний частоты [2, 7, 9].

Переключательная модель случайных колебаний частоты суммы синусоидального сигнала и гауссова шума. Представим случайные колебания частоты $u(t)$ в виде суммы двух статистически зависимых составляющих [7, 8]: гауссовой $\eta(t)$ и импульсной $p(t)$:

$$u(t) = \eta(t) + p(t) = \alpha(t)\eta_0(t) + [1 - \alpha(t)]p_0(t), \quad (2)$$

где $\eta_0(t)$ и $p_0(t)$ – порождающие процессы для гауссовой и импульсной составляющих шума соответственно; $\alpha(t)$ – независимый от них переключательный (точечный) случайный процесс:

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1 & \text{– при гауссовой составляющей} \\ & \text{колебаний частоты;} \\ 0 & \text{– при импульсной.} \end{cases}$$

Эти явления связаны с изменениями фазы результирующего вектора на $\pm 2\pi$. По существу, шум в оценке частоты переключается с нормального на импульсный в моменты перехода фазы на $\pm 2\pi$.

Энергетический спектр $S_\varphi(f)$ шума $\varphi(t)$ запишем в виде

$$S_u(f) = S_p(f) + 2S_{\eta p}(f) + S_\eta(f), \quad (3)$$

где $S_\eta(f)$ и $S_p(f)$ – энергетические спектры гауссовой и импульсной составляющих шума; $S_{\eta p}(f)$ – их взаимный энергетический спектр.

Энергетический спектр импульсной составляющей шума в первом приближении находим по известной формуле [1]:

$$S_p(f) = 4\pi^2(N_+ + N_-) \text{ при } -\infty < f < \infty, \quad (4)$$

где N_\pm – среднее число скачков фазы суммы узкополосного процесса на $\pm 2\pi$ соответственно.

Выражение (4) предполагает, что спектр импульсной составляющей – равномерный и с учетом независимости возникновения импульсов представляет собой сумму спектров от всех импульсов. Равномерность спектра импульсной составляющей определяется малой длительностью аномальных выбросов. Приближенность выражения (4) состоит в независимости числа скачков фазы от отклонения частоты от номинального значения (как будет показано далее – это не так).

В переключательной модели колебаний частоты полагают, что гауссова составляющая колебаний частоты действует в те отрезки времени, когда вектор суммы принимаемого сигнала и шума попадает в круг радиуса Q с центром в точке 0 (рис. 1,а). В этом случае среднее значение переключательного процесса равно [6–8]:

$$\alpha_0 \rho = 1 - e^{-\rho}, \quad (5)$$

где $\rho = Q^2 / 2\sigma_n^2$ – отношение мощности сигнала к мощности шума.

В этих случаях обход фазового вектора вокруг начала координат и нарушения синхронизма не происходит. На остальных интервалах возможны переходы фазы на $\pm 2\pi$. По существу, шум в оценке частоты переключается с нормального на импульсный в моменты перехода фазы на $\pm 2\pi$.

В [7] получена спектральная плотность колебаний частоты узкополосного процесса по переключательной модели в виде:

$$S_{\text{и}}(f) = 4\pi^2 (N_+ + N_-) + \frac{(1 - e^{-\rho})^2}{2\rho} (2\pi f)^2 S_{\text{вх}}(f - f_c) - 2(2\pi)^2 (1 - e^{-\rho}) e^{-\rho} f b_1 S_{\text{вх}}(f - f_c) \quad \text{при } -\infty < f < \infty, \quad (6)$$

где

$$b_n = (2\pi) \int_0^{\infty} S_{\text{вх}}(f - f_c) df; \quad (7)$$

f_c – номинальное значение частоты.

Первая часть спектральной плотности определяется скачками фазы на $\pm 2\pi$, вторая – малыми колебаниями частоты с квадратичным характером спектра, и последняя часть спектра определяется отклонением частоты от среднего (номинального) значения симметричного формирующего фильтра f_c . При отсутствии этого отклонения частоты третий член в выражении (6) исчезает.

Недостатком выражения (6) является неопределенность первой составляющей спектра, поскольку в явном виде среднее число скачков фазы на $\pm 2\pi$ неизвестно и может быть оценено (см. ниже) только по точной модели спектральной плотности с

учетом отклонения частоты от номинального значения и $\rho = Q^2 / 2\sigma_n^2$.

Основным параметром, характеризующим сумму $\xi(t)$ модулированного по частоте сигнала $Q \cos(\omega_0 t + \Phi(t))$ и гауссовского шума $n(t)$, служит отношение мощности синусоидального процесса к мощности шума $\rho = Q^2 / 2\sigma_n^2$ [1, 3]. Этот параметр характеризует отклонение реального процесса $\xi(t)$ от идеальной синусоиды.

Подобным образом в электроэнергетике аналогом мощности шума ρ в канале связи служит мощность колебаний частоты меньшей ЭЭС в режимах, близких к предельному. Область значений ρ , близких к «1», называют пороговой. В надпороговой области $\rho \gg 1$ вероятность переходов фазы между уровнями $\pm 2\pi$ крайне мала (практически таких переходов нет). В подпороговой области ($\rho \leq 1$), напротив, переходы фазы случаются достаточно часто.

Переходы фазы между уровнями $\pm 2\pi$ приводят к значительному (на несколько порядков) снижению точности измерения частоты.

При воздействии на основной процесс (1) помехи $n(t)$ вектор $R(t)e^{j\Psi(t)}$, как правило, флуктуирует (см. рис. 1,а) в области конца вектора амплитуды сигнала, но при больших колебаниях $n(t)$ может совершать полный оборот вокруг начала координат, в результате чего фаза $\Psi(t)$ меняется на $\pm 2\pi$. При этом производную фазовой ошибки $\Psi'(t)$, которая имеет вид импульса площадью 2π , называют в каналах связи аномальным выбросом частоты.

Типичная траектория фазовой ошибки $\Psi(t)$ приведена на рис. 1,б, где начало и конец аномального выброса отмечены точками t_0 и t_1 . При больших значениях $\rho \gg 1$ случайные колебания частоты имеют нормальное распределение и малую интенсивность. Аномальные выбросы частоты происходят крайне редко. Они возникают при малых (порядка «1» и ниже) отношениях сигнал/шум ρ . В задачах электроэнергетики эта ситуация возникает в режимах, близких к предельному по передаваемой мощности. Колебания в измерениях частоты как бы переключаются с малого (нормального) на большой (аномальный) режимы в моменты перехода фазы между уровнями $\pm 2\pi$.

Примером такого взаимодействия из электроэнергетики может служить поведение двух частей энергообъединения (или в модели двух узлов с генерацией и нагрузкой), объединенных слабой связью. Моделирование этой системы в динамике со слабой связью при случайных колебаниях нагрузки приводит к колебаниям фаз и частоты напряжений узлов, напоминающих соответствующие колебания в каналах связи (см. рис. 1,б). Временная потеря

синхронизма в этом случае является аналогом аномальных выбросов частоты в системах связи.

Строго говоря, такой режим нельзя назвать односторонним, поскольку во время переходов фазы на $\pm 2\pi$ частоту энергообъединения нельзя считать единой. Тем не менее, переключательная модель поведения частоты позволяет рассмотреть этот случай. Переходы фазы на $\pm 2\pi$ в отдельных узлах, как упоминалось ранее, происходят достаточно редко при больших колебаниях нагрузки в меньшей ЭЭС, и поэтому их можно считать неперекрывающимися.

На рис. 2 представлены значения спектральной плотности частоты узкополосного процесса $\omega(0)$ для четырех значений нормированных отклонений частоты $\Delta f = 0; 0,25; 0,5$ и $1,0$ от номинального значения в зависимости от отношения сигнал/шум ρ , полученных по значениям спектральной плотности точной модели [9] в нуле. Эти значения определяются средним числом скачков фазы на $\pm 2\pi$.

Еще раз подчеркнем важность оценки значений спектральной плотности частоты $\omega(0)$. Этот параметр определяет точность измерений производной фазы (т.е. частоты) в условиях действия помех и последующего его сглаживания фильтром низких частот. Отметим, что при отклонении частоты Δf от номинального значения спектральная плотность производной фазы $\omega(0)$ значительно возрастает (см. рис. 2), т.е. при отклонении измеряемой частоты от номинального значения число переходов фазы на $\pm 2\pi$ узкополосного процесса резко возрастает,

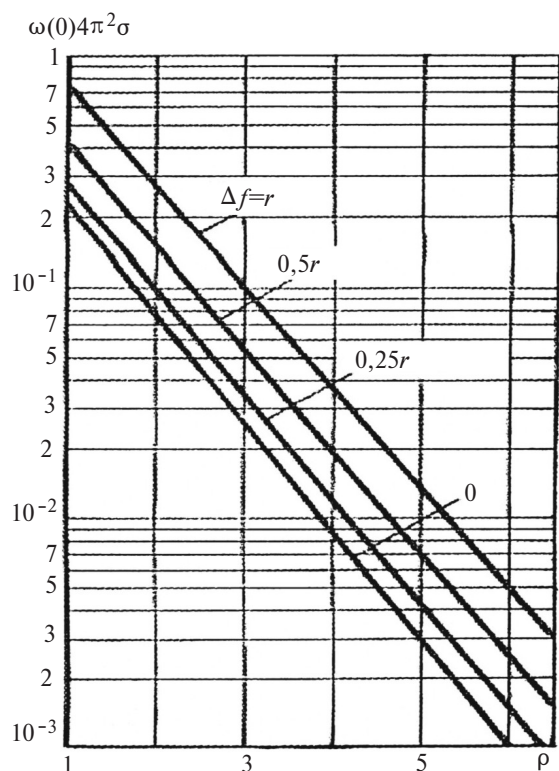


Рис. 2. Спектральная плотность колебаний частоты $\omega(0)/4\pi^2\sigma$

что приводит к снижению точности ее измерений в режимах, близких к предельным.

Характеристики нарушений синхронизма. Далее рассмотрим зависимость нарушений синхронизма в предельных режимах простейшего энергообъединения от мощности меньшей ЭЭС, отклонения частоты энергообъединения от номинального значения и направления перетока активной мощности. В реальной практике диспетчерского управления рассматриваемые далее режимы, как правило, недопустимы, но в утяжеленных и аварийных случаях могут иметь место.

Важно найти зависимость частоты возникновения асинхронных режимов и восстановления нормальных режимов от активной мощности подключаемой ЭЭС при фиксированных параметрах связи (ВЛ). Далее приведем несколько экспериментов на двухузловой цифровой модели энергообъединения для разных режимных условий.

1. Исходный режим энергообъединения из двух ЭЭС сбалансирован при межсистемном перетоке активной мощности, равном 0. Режим максимально удален от утяжеленного. Изменения режима моделируются только случайными колебаниями активной и реактивной нагрузки, которые максимально (коэффициент «1») коррелированы. Даже в таком экзотическом режиме можно моделировать переходы фазы меньшей ЭЭС на $\pm 2\pi$ при достаточно большом сопротивлении межсистемной связи.

Первая серия графиков на рис. 3 показывает регистрограммы отклонений частоты и фазы от установленной мощности меньшей ЭЭС при наличии случайных колебаний нагрузки. Интенсивность случайных колебаний нагрузки при моделировании пропорциональна установленной мощности меньшей ЭЭС, а интервал корреляции колебаний нагрузки составляет примерно 50 с. Интенсивность колебаний нагрузки примерно соответствует их реальным параметрам в энергообъединении.

Графики на рис. 3 получены при фиксированном сопротивлении ветви связи $10 + j8000$ Ом (т.е. при очень слабой связи). Исходный режим далек от предельного. При таких (нереальных) параметрах связи двух систем за счет колебаний нагрузки редко формируется режим, близкий к предельному по передаваемой мощности, и возникают условия для обхода фазового вектора вокруг начала координат, т.е. скачок фазы на $\pm 2\pi$. Представленный модельный эксперимент приводится для понимания физики изменений параметров в предельном по пропускной способности режиме. Этот режим формируется в рассматриваемом случае при предельно слабой связи за счет колебаний активной мощности нагрузки меньшей ЭЭС.

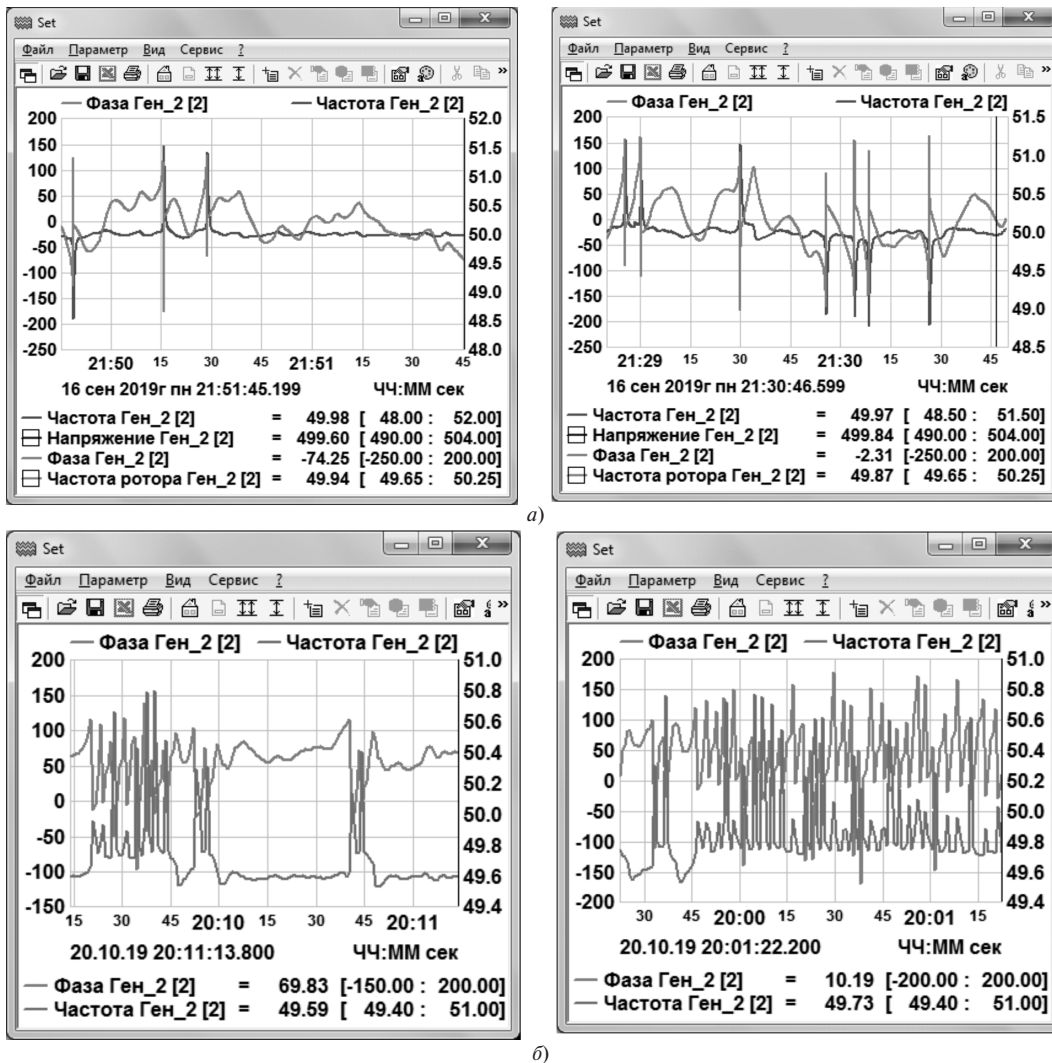


Рис. 3. Скачки частоты и фазы меньшей ЭЭС при нагрузке 500 и 1000 мВт: а – $\Delta f = 0$; б – $\Delta f = 0,4$ Гц

В диапазоне мощности эквивалентного узла от 2000 до 500 МВт наблюдаются пропорциональное уменьшение количества скачков фазы на $\pm 2\pi$ и их практически равновероятное положительное и отрицательное значение. Это явление легко объяснить. Действительно, с уменьшением мощности нагрузки падает интенсивность ее случайных колебаний и как следствие снижается вероятность обхода результирующего вектора вокруг начала координат на рис.1,а. Напоминаем, что графики на рис. 3,а даны для нулевого отклонения средней частоты от номинального значения (50 Гц) и нулевого значения исходного межсистемного перетока активной мощности.

2. Вторая серия экспериментов (см. рис. 3,б) уточняет условия и параметры скачков фазы меньшей ЭЭС при режиме, близком к предельному по передаваемой активной мощности, и отклонении средней частоты от номинального значения. В этом случае нарушение синхронизма возникает при исходном перетоке активной мощности порядка 150 мВт, разности фаз на концах ВЛ порядка

$\pm 0,4\pi$, отклонениях общей частоты $\Delta f = 0,4$ Гц и случайных колебаниях нагрузки. Небаланс активной мощности задан только в меньшей ЭЭС.

В зависимости от знака перетока в исходном режиме направления импульсов частоты меняются и всегда в направлении снижения среднего значения частоты. Интенсивность импульсов частоты пропорциональна мощности меньшей ЭЭС, так как интенсивность случайных колебаний нагрузки также пропорциональна мощности меньшей ЭЭС.

Необходимо отметить, что импульсы частоты возникают в те интервалы времени, когда фаза меньшей ЭЭС достигает π и далее происходит проворот фазы до 2π . Проворотов фазы в обратном направлении практически нет.

Выполнение симметричного эксперимента с $\Delta f = -0,4$ Гц и перетоком мощности 150 мВт дает изменение полярности импульсов (здесь не приводится).

3. Важно определить, что является первопричиной возникновения скачков фазы на $\pm 2\pi$ одной полярности:

сдвиг частоты в энергообъединении на $\Delta f = \pm 0.4$ Гц; направление предельного значения перетока активной мощности порядка 150 мВт.

Следующий пример дает ответ на этот вопрос. На рис. 4 представлены две регистрограммы для симметричного режима энергообъединения (для небалансов рассматриваемых ЭЭС) при сохранении нулевого отклонения частоты и изменении направления перетока активной мощности. Режим достигается одновременным изменением небаланса мощности в каждом узле расчетной схемы с разным знаком. В этом случае, как и в предыдущем, приближение к предельному режиму приводит при наличии случайных колебаний нагрузки к возникновению скачков фазы меньшей ЭЭС на $\pm 2\pi$ в зависимости от направления перетока мощности и небалансе меньшей ЭЭС (+150 МВт или -150 МВт соответственно).

Первый из графиков на рис. 4 дает значения фазы и частоты меньшей ЭЭС при положительном небалансе в меньшей ЭЭС и перетоке из меньшей ЭЭС. На втором графике на рис. 4 небаланс и переток мощности меняют знак. Следует обратить внимание на изменение знака импульсов частоты. Разность фаз на концах ВЛ составляет в этом случае -76° . Дальнейшее изменение фазы меньшего узла происходит при включении режима случайных колебаний нагрузки (см. рис. 4).

По результатам приведенных модельных экспериментов можно сделать важные выводы:

скачки фазы на $\pm 2\pi$ меньшей ЭЭС от колебаний нагрузки возникают при исходном режиме вдали от предельных режимов при очень слабой межсистемной связи;

интенсивность скачков фазы на $\pm 2\pi$ меньшей ЭЭС от колебаний нагрузки возрастает по мере приближения перетока к предельному режиму;

интенсивность скачков фазы на $\pm 2\pi$ меньшей ЭЭС на предельных режимах пропорциональна мощности нагрузки этой ЭЭС;

знак импульсов частоты при переходах фазы на $\pm 2\pi$ определяется направлением межсистемного перетока активной мощности;

интенсивность скачков фазы меньшей ЭЭС на $\pm 2\pi$ практически не зависит от общего небаланса активной мощности, т.е. от смещения общей частоты в отличие от скачков фазы на $\pm 2\pi$ в каналах связи с ЧМ;

направления скачков фазы и импульсов частоты зависит (главным образом) от направления межсистемного перетока активной мощности.

Важно отметить, что направление скачков частоты в меньшей ЭЭС зависит только от знака небаланса активной мощности в меньшей ЭЭС и практически не зависит от отклонения частоты во всей системе (в отличие от представленных ранее экспериментов, которые проведены при больших исходных отклонениях частоты).

На всех представленных регистрограммах даны режимы, самовостанавливающие синхронизм с энергообъединением после кратковременных его нарушений их-за случайных колебаний нагрузки, приводящих к нарушению предельных по пропускной способности связи режимов.

Оценка надежности предельных режимов. Приведенные характеристики узкополосных случайных процессов колебаний частоты меньшей ЭЭС в энергообъединении позволяют дать оценку надежности предельного режима. В рабочих режимах межсистемной связи предусмотрен запас пропускной способности, который не допускает возникновения кратковременных асинхронных режимов за счет случайных колебаний перетоков активной мощности.

Однако, как отмечено ранее, возможны предельные режимы, в которых в результате случай-

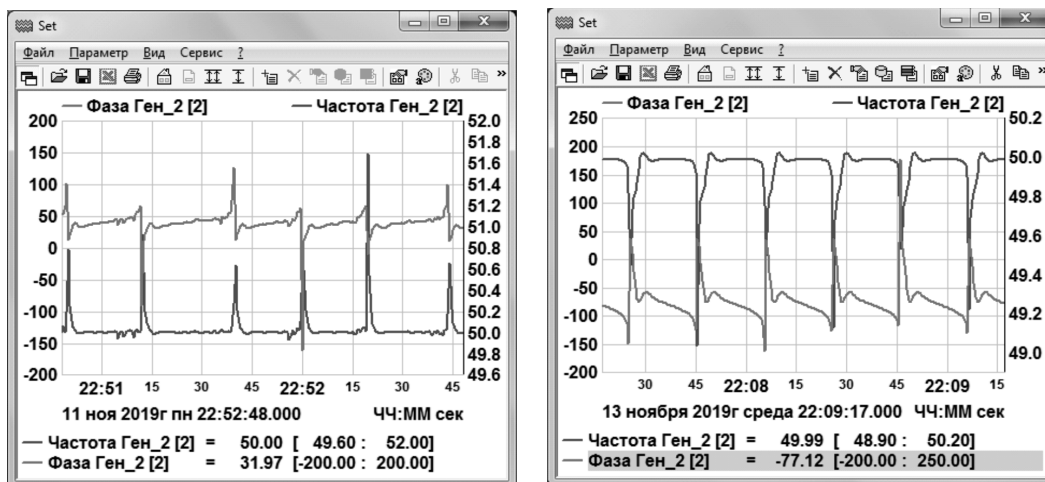


Рис. 4. Скачки частоты и фазы меньшей ЭЭС при смене знака перетока и $\Delta f = 0$ Гц

ных колебаний нагрузки меньшей ЭЭС возникают кратковременные нарушения синхронизма и скачки фазы на $\pm 2\pi$. Эти скачки приводят к импульсам частоты в виде аномальных выбросов определенной полярности.

Частота является измеряемым параметром, и по характеру импульсов частоты при нарушении предельного режима можно сделать вывод о направлении перетока мощности и тяжести нарушения режима. Можно в таких режимах предусмотреть импульсное управление режимом по характеру импульсов частоты в кратковременных нарушениях синхронизма. Значение импульсного управления является самостоятельной задачей, которая рассматривается в дальнейшем. Аналогом такого управления в каналах связи с ЧМ [2] являются кратковременные импульсы площадью 2π , которые компенсируют соответствующие скачки фазы.

Распределение аномальных выбросов частоты по длительности. Распределение скачков фазы на $\pm 2\pi$ по длительности определяет интервалы времени потери синхронизма в энергообъединении, интервалы времени потери точности измерения частоты и фазы и, возможно, другие характеристики (например, близость режима ВЛ к предельному).

Обозначим длительность скачка фазы на $\pm 2\pi$ на рис. 1,б через $\tau = t_1 - t_0$. Скачок фазы $\varphi(t)$ на $\pm 2\pi$ начинается и заканчивается в моменты времени t_0 и t_1 соответственно [11], когда квадратурная составляющая шума $n_s(t)$ пересекает нулевой уровень с производной одинакового знака, причем все промежуточные нули $n_s(t)$ имеют место при условии:

$$n_c(t) + Q \leq 0 \text{ для } t_0 < t < t_1. \quad (7)$$

В первом приближении для малых значений τ можно предположить, что при скачке фазы на $\pm 2\pi$ имеется только один промежуточный нуль процесса $n_s(t)$, происходящий при условии (7). Дальнейшее приближение состоит в аппроксимации плотности распределения длительности аномальных выбросов частоты для малых τ дифференциальной вероятностью $P(\tau, 0)$ пересечений нулевого уровня квадратурной составляющей шума $n_s(t)$ с положительной производной в момент времени $t_0 + \tau$ при условии, что в момент времени t_0 пересечение нулевого уровня происходило также с положительной производной [11]:

$$P(\tau, 0) = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty y_1 y_2 \omega_4(0, y_1, 0, y_2) dy_1 dy_2}{\int_0^\infty y \omega_2(0, y) dy}, \quad (8)$$

где $\omega_2(x, y)$ – плотность распределения процесса $n_s(t)$ и его производной в один и тот же момент

времени: $\omega_4(x_1, y_1, x_2, y_2)$ – совместная плотность распределения значений процесса $n_s(t)$ и его производной в моменты времени t_0 и $t_0 + \tau$ соответственно.

Вычислив интегралы, получим:

$$P(\tau, 0) = \frac{\sqrt{-R''(0)} D_{33} \sqrt{1-r^2}}{2\pi (1-R^2)^{3/2}} (1 - \text{Harcctg} H), \quad (9)$$

где $R(\tau)$ – нормированная корреляционная функция гауссовского случайного процесса; $D_{33} = 1 - R_{11}^2$; $D_{34} = RR_1^2 - R_2(1 - R^2)$; $r = D_{34}/D_{33}$; $R_1 = R'(\tau)/\sqrt{-R''(0)}$; $R_2 = R''(\tau)/R''(0)$; $H = r/\sqrt{1-r^2}$.

Для малых τ , разлагая $R(\tau)$ в ряд Тейлора, легко показать, что $P(\tau, 0) \approx \text{const} \tau^4$, т.е. на начальном фрагменте плотность распределения можно аппроксимировать полиномом четвертой степени.

На рис. 5 сравниваются (полученные цифровым моделированием [10, 11]) плотность распределения $\omega(\tau)$ и оценки плотности распределения скачков фазы на $\pm 2\pi$ по длительности (точки) для $\lambda = 0$. Из рис. 5 видно, что плотность распределения $\omega(\tau)$ хорошо аппроксимирует плотность распределения скачков фазы на $\pm 2\pi$. Там же приведена дифференциальная вероятность $P(\tau, 0)$ распределения длительности интервалов между соседними нулями узкополосного процесса [5], практически совпадающая с экспериментальными результатами для $\tau \leq 3,5$. Полученные экспериментальные результаты и их сравнение с теоретическими для ненулевой расстройки $\lambda = 0,25; 0,5$ имеют аналогичный характер.

$\omega_A(\tau); \omega(\tau); P(\tau, 0)$

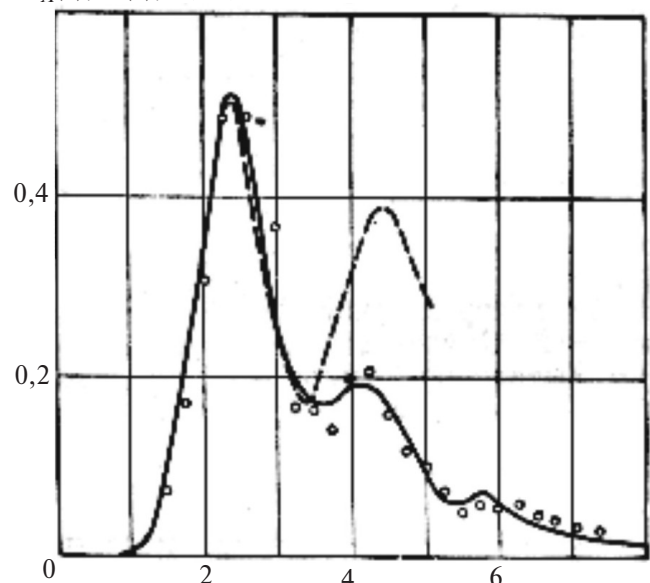


Рис. 5. Плотность распределения $\omega(\tau)$ (—) и оценки плотности распределения скачков фазы на $\pm 2\pi$ по длительности (····) для $\lambda = 0$

Из приведенных результатов следует, что плотность распределения длительности аномальных выбросов частоты подчиняется закону, близкому к закону плотности распределения интервалов времени между ближайшими нулями гауссовского узкополосного случайного процесса с одинаковым направлением производных [5, 11].

Таким образом, длительность фазовых переходов на $\pm 2\pi$ имеет многомодовый характер и определяется полосой частот рабочих режимов энергообъединения.

Заключение. Для номинального значения частоты энергообъединения среднее число положительных и отрицательных скачков фазы одинаково. При отклонении частоты от номинального значения, вызванного небалансом активной мощности всего энергообъединения, число скачков фазы, уменьшающих среднее отклонение частоты значительно (на порядок) превышает число скачков частоты с противоположным знаком. Аналогичная картина наблюдается при режиме с номинальной частотой и предельным значением перетока активной мощности. В этом случае направления скачков частоты зависят от исходного направления перетока активной мощности.

Результаты работы могут применяться для визуальной идентификации близости режима к предельному.

Автор благодарит доктора технических наук В.А. Рябченко за полезные советы при выполнении настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rice S.O. Time Series Analysis/Ed. M. Rosenblatt. New-York, John Wiley, 1963.
2. Рабинович М.А. Статистические характеристики частоты узкополосного случайного процесса. — Электричество, 2016, № 5, с. 13–26.
3. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970, 392 с.
4. Рабинович М.А. О взаимной корреляции шума и его гауссовской составляющей в оценке частоты частотным дискриминатором. — Радиотехника, 1974, 29, № 7.
5. Андронов А.А., Рабинович М.А. Распределение длительности аномальных выбросов частоты и нули гауссова случайного процесса. — Радиотехника, 1978, т. 33, № 8, с. 72–75.
6. Rabinovich M., Yaroslavsky L. Results of Noise Statistics Measurements in FM Receiver. — 2nd Intern. Symposium on Information Theory Akademiai, Kiado, Budapest, pp. 375–386.
7. Рабинович М.А. О статической модели шума на выходе частотного дискриминатора. — Радиотехника, 1975, № 4, с. 88–90.
8. Rice S.O. «BSTJ», 1948, vol. 27, № 1.
9. Рабинович М.А. Корреляционная функция и энергетический спектр производной фазы модулированного по частоте сигнала и аддитивного гауссова шума. — Радиотехника, 1977, № 5, с. 48–52.
10. Миркин Л.И., Рабинович М.А., Ярославский Л.П. Метод генерирования коррелированных гауссовских псевдослучайных чисел. — ЖВМ и МФ, 1972, т. 12, № 5.
11. Андронов А.А., Рабинович М.А. О распределении длительности аномальных выбросов частоты. — Тезисы докладов на всесоюзной конф. по теории кодирования и передачи информации. Вильнюс, 1978.

[09.12.2019]

А в т о р: Рабинович Марк Аркадьевич — доктор техн. наук, главный эксперт отдела Системного моделирования ОАО «НТЦ ФСК ЭЭС», диссертацию защитил в 2005 г.

Statistical Characteristics of the Frequency in a Grid Connected to the Power Pool via a Weak Link

RABINOVICH Mark A. (JSC «Scientific-Technical Center of the Unified Energy System Federal Network Company», Moscow, Russia) — Examiner-in-Chief of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

The statistical characteristics of the frequency in a grid connected to a power pool via a weak link under the conditions of random load fluctuations at the network nodes are considered. It is supposed in the analysis that a small grid is connected to the power pool via a link that operates close to its limit mode, so that random load fluctuations, short circuit faults, and other disturbances give rise to short-term out-of-step modes. The average number of loss-of-synchronism and recovery occurrences, the parameters characterizing step-like changes of frequency and phase in the small grid, and other parameters depending on the mode severity and active power flow direction are considered. A switched model describing random frequency fluctuations in the small grid in normal and limit modes of its operation is presented. Step-like changes of frequency and phase in the smaller grid can serve as an indicator characterizing the proximity of the system to the limit (emergency) mode. An analogy in the behavior of phase and frequency in communication systems with frequency modulation (FM) and in electric power systems is pointed out.

Key words: electric power system, frequency, interference, measurement error, spectral density, phase jumps

REFERENCES

1. **Rice S.O.** Time Series Analysis/Ed. M. Rosenblatt. New-York, John Wiley, 1963.
2. **Rabinovich M.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 5. p. 13–26.
3. **Tikhonov V.I.** *Vybrosy sluchaynykh protsessov* (Emissions of random processes). Moscow, Nauka, 1970, 392 p.
4. **Rabinovich M.A.** *Radiotekhnika – in Russ. (Radio engineering)*, 1974, 29, No. 7.
5. **Andronov A.A., Rabinovich M.A.** *Radiotekhnika – in Russ. (Radio Engineering)*, 1978, vol. 33, No. 8, pp. 72–75.
6. **Rabinovich M., Yaroslavsky L.** Results of Noise Statistics Measurements in FM Receiver. – 2nd Intern. Symposium on Information Theory Akademiai, Kiado, Budapest, pp. 375–386.
7. **Rabinovich M.A.** *Radiotekhnika – in Russ. (Radio Engineering)*, 1975, No. 4, pp. 88–90.
8. **Rice S.O.** «BSTJ», 1948, vol. 27, No. 1.
9. **Rabinovich M.A.** *Radiotekhnika – in Russ. (Radio Engineering)*, 1977, No 5, pp. 48–52.
10. **Mirkin L.I., Rabinovich M.A., Yaroslavskiy L.P.** *Metod generirovaniya korrelirovannykh gaussovskikh psevdosluchainykh chisel* (Method for generating. Correlated Gaussian pseudorandom numbers). – *ZhVM and MF*, 1972, vol. 12, № 5.
11. **Andronov A.A., Rabinovich M.A.** *O raspredelenii dlitel'nosti anomal'nykh vybrosov chastoty. – Tezisy dokladov na vsesoyuznoy konf. po teorii kodirovaniya i peredachi informatsii* (About the distribution of the duration of anomalous frequency outliers. – Abstracts at the All-Union conf. on the Theory of Coding and Information Transfer). Vil'nyus, 1978.

[09.12.2019]