

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Материалы  
IX Всероссийской научно-технической  
конференции

---

---

*ИТЭЭ-2014*

---

---

ЧЕБОКСАРЫ

2014

В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов  
(Чебоксары, ЧГУ, НПП «ЭКРА»)

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЛЬТРОВ  
ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В докладе рассматриваются генеральные свойства методов определения ортогональных составляющих гармоники электрической величины

$$x(k) = X_m \cos(\omega k T_s + \psi), \quad (1)$$

где  $X_m > 0$  и  $\omega > 0$  – амплитуда и угловая частота (далее для краткости – частота) гармоники,  $T_s$  – период дискретизации,  $kT_s$  – текущее дискретное время.

В общем случае частота гармоники  $\omega$  отличается от номинальной частоты  $\omega_0$ , поэтому

$$\omega = \omega_0(1 + q),$$

где  $q$  – относительное значение девиации частоты относительно номинального значения;  $q = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ . Поскольку номинальная

частота  $\omega_0$  обычно известна, то удобно гармонику (1) представлять в базисе синусоидальных составляющих номинальной частоты  $\omega_0$

$$x(k) = X_m \cos(q\omega_0 k T_s + \psi) \cos(\omega_0 k T_s) - X_m \sin(q\omega_0 k T_s + \psi) \sin(\omega_0 k T_s) = \\ x(k) = c(k) \cos(\omega_0 k T_s) - s(k) \sin(\omega_0 k T_s).$$

Фазы гармонических функций разностной частоты  $q\omega_0$

$$c(k) = X_m \cos(q\omega_0 k T_s + \psi)$$

и

$$s(k) = X_m \sin(q\omega_0 k T_s + \psi)$$

сдвинуты на 90 градусов, в связи с чем они получили название ортогональных составляющих (ортосоставляющих) [лит.]. Орто-

составляющие связаны с амплитудой  $X_m$  и начальной фазой  $\psi$  гармоники следующими соотношениями:

$$\hat{X}_m = \sqrt{c^2(k) + s^2(k)} = X_m, \quad (2)$$

$$\hat{\psi} = \psi + q\omega_0 k T_s = \tan^{-1} \left[ \frac{s(k)}{c(k)} \right]. \quad (3)$$

Оценка амплитуды  $\hat{X}_m$  по (2) не зависит от частоты гармоники и равна искомой амплитуде  $X_m$  гармоники, но оценка  $\hat{\psi}$  начальной фазы  $\psi$  по (3) будет иметь смещение, зависящее от времени  $k$ . И только при номинальной частоте, когда  $\omega = \omega_0$ , или при синхронной частоте дискретизации, когда  $\omega T_s = \text{const}$ ,  $q = 0$  и ортосоставляющие не меняются во времени:

$$c(k) = X_m \cos \psi, \quad s(k) = X_m \sin \psi.$$

Тогда оценка  $\hat{\psi}$  начальной фазы  $\psi$  не будет иметь смещения, т.е.  $\hat{\psi} = \psi$ .

В алгоритмах цифровых систем защиты и автоматики оценка начальной фазы, как правило, не имеет самостоятельного значения. Действительно, в измерительных органах с одной подведенной величиной главное значение имеет оценка амплитуды, а она не зависит от времени. В измерительных органах с двумя подведенными величинами, например, в органах сопротивления и активной мощности, используется оценка  $\hat{\phi}$  разности начальных фаз гармоник напряжения  $\psi_u$  и тока  $\psi_i$ , получаемая как разность оценок начальных фаз согласно (3):

$$\hat{\psi}_u = \psi_u + q\omega_0 k T_s$$

и

$$\hat{\psi}_i = \psi_i + q\omega_0 k T_s.$$

Поэтому оценка разности фаз  $\hat{\phi} = \hat{\psi}_u - \hat{\psi}_i$  будет свободна от смещения и равна  $\psi_u - \psi_i$ .

Таким образом, при отклонении частоты гармоники от номинальной оценки, получаемые любыми фильтрами ортого-



нальных составляющих, будут меняться во времени, в связи с чем в оценке начальной фазы возникает смещение. Значение смещения зависит линейно от момента времени вычисления оценки и отклонения частоты гармоники от номинального значения. Свойства ортогональных составляющих и вычисляемых на их основе оценок амплитуды и начальной фазы не зависят от метода их определения.

#### Литература

Лямец Ю.Я. Разложение входных величин релейной защиты на ортогональные составляющие / Ю.Я. Лямец, Н.В. Подшивалин // Известия РАН. Энергетика. — 1986. — № 3. — С. 62–70.

В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов  
(Чебоксары, ЧГУ, НПП«ЭКРА»)

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ТОКА СЕТЕЙ 110-750 КВ

Измерительные органы цифровых систем релейной защиты и автоматики (РЗА), использующие классический фильтр Фурье для определения основной гармоники тока, имеют быстроедействие не более одного периода промышленной частоты. Одним из путей повышения быстрогодействия является использование методов обработки сигнала на окне наблюдения менее одного периода промышленной частоты, например методов структурного анализа [1].

Основой структурного анализа является адаптивная модель сигнала. Из-за структурной неопределенности сигнала порядок адаптивной модели приходится брать заведомо больше порядка распознаваемого сигнала [2]. Поэтому для повышения распознающей способности структурного анализа желательно знать верхнюю границу порядка сигнала.

Настоящая работа посвящена анализу режимов электрических сетей 110–750 кВ с точки зрения характера и структуры сигналов тока на входе РЗА.

В сети с нелинейной нагрузкой (выпрямители, дуговые печи, статические компенсаторы реактивной мощности, инверторы и т.д.) ток наряду с основной гармоникой будет содержать высшие гармоники. Поскольку в России отсутствуют требования к содержанию высших гармоник в токе, то для оценки уровня высших гармоник можно использовать нормы стандарта [3]. Согласно им в сетях высокого напряжения действующее значение гармоник с номерами до 11 не превышает 7,5% и 1,875% основной гармоники для нечетных и четных гармоник соответственно. В сетях сверхвысокого и ультравысокого напряжения те же параметры будут равны 3,0% и 0,75% соответственно.

В стандарте [3] нормируется содержание гармоник и более высоких порядков, однако их влияние на работу РЗА устраняют специальные фильтры нижних частот измерительного тракта. Амплитудно-частотная характеристика этих фильтров выбирается таким образом, чтобы все гармоники с частотой выше частоты Найквиста были подавлены. Поэтому можно считать, что максимальная частота гармоники во входных сигналах РЗА не превышает половины частоты дискретизации сигнала.

При коротком замыкании (КЗ) в токе может появиться апериодическая и затухающие периодические слагаемые. Постоянная времени апериодической слагаемой может быть от 0,15 до 0,35 с при КЗ на шинах электрической станции и от 0,02 до 0,08 с – при КЗ на шинах подстанции [4]. Частоты затухающих периодических слагаемых могут быть как ниже, так и выше частоты основной гармоники [5]. В токе КЗ в сетях с протяженными линиями электропередачи число затухающих гармонических слагаемых значительно, но энергия свободного процесса сосредоточена в основном в апериодической слагаемой и затухающей периодической слагаемой самой низкой частоты. Остальные слагаемые по уровню обычно слабы, а их частоты превышают частоту Найквиста [6].

Таким образом, порядок входного сигнала РЗА при КЗ зависит от класса напряжения и колеблется от 3 до 5. Наличие высших гармоник повышает порядок сигнала. Максимальная частота гармоники определяется частотой Найквиста.