

# Оценка гармоник электрической величины на фоне преобладающего гармонического спектра шума

АНТОНОВ В.И., НАУМОВ В.А., СОЛДАТОВ А.В., ЕГОРОВ Н.В.

В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью для релейной защиты в качестве информационной слагаемой используется гармоника, возникающая в схеме однофазного замыкания на землю. Уровень этой информационной слагаемой уступает уровню составляющей основной гармоник сети, являющейся в этом случае гармонической помехой, поэтому информационная слагаемая часто неразличима для тракта аналого-цифрового преобразования (АЦП) защиты. Предлагается схема построения тракта АЦП цифровой системы релейной защиты, предназначенного для распознавания слабой гармоник электрической величины на фоне преобладающего гармонического шума. Исследуется разрешающая способность тракта, приводится методика выбора элементов тракта, оптимальных с точки зрения достижения необходимой точности оценки информационной слагаемой.

Ключевые слова: релейная защита, аналого-цифровое преобразование, гармонический шум, слабые гармоники, оценка

В релейной защите сетей с изолированной или компенсированной нейтралью в качестве информационной слагаемой используется гармоника, возникающая в схеме однофазного замыкания на землю. Обычно она представляет собой либо высшую гармонику, либо субгармонику, специально инжектируемую в сеть [1–3]. Уровень информационной слагаемой в принципе не может быть значительным и существенно уступает уровню составляющей основной гармоник сети, являющейся в этом случае, по сути, гармонической помехой. Поэтому информационная слагаемая часто неразличима для тракта аналого-цифрового преобразования (АЦП) цифровой защиты, что приводит к необходимости решения задачи повышения разрешающей способности тракта при оценке гармоник на фоне преобладающего гармонического шума.

Рассматривается задача оценки параметров информационной слагаемой в виде гармоник частоты  $\omega_0$

$$x_0(t) = X_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0)$$

на фоне преобладающего гармонического спектра шума частоты  $\omega_p$

$$x_p(t) = X_p \sin(\omega_p t + \theta_x)$$

в сигнале

$$x(t) = x_0(t) + x_p(t)$$

трактом АЦП цифровой релейной защиты (рис. 1). В общем случае частота  $\omega_0$  может быть как больше, так и меньше частоты  $\omega_p$ . На практике, как правило, они кратны друг другу.

Обычно селективный преобразователь уровня включает в себя аттенюатор и аналоговый фильтр и

обеспечивает необходимое усиление информационной слагаемой  $x_0(t)$  и подавление гармонического шума  $x_p(t)$ .

Коэффициенты  $k_0 = A_0 / X_0$  и  $k_p = A_p / X_p$  селективного преобразователя уровня должны выбираться таким образом, чтобы в сигнале

$$a(t) = a_0(t) + a_p(t),$$

поступающем на вход аналого-цифрового преобразователя, информационная слагаемая

$$a_0(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0) = k_0 X_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0)$$

была достаточной для обеспечения необходимого уровня точности оценки ее параметров на фоне гармонического шума

$$a_p(t) = A_p \sin(\omega_p t + \psi_p) = k_p X_p \sin(\omega_p t + \psi_p).$$

Как и в [4 и 5], полагаем, что АЦП обладает линейной характеристикой преобразования, а сама операция преобразования осуществляется мгновенно, и шум квантования, вызванный погрешностью АЦП, имеет максимальный уровень  $\epsilon$ . Следовательно, цифровой сигнал

$$a(k) = a_0(k) + a_p(k) + w(k), \quad (1)$$

поступающий на вход фильтра ортогональных составляющих, будет содержать шум квантования

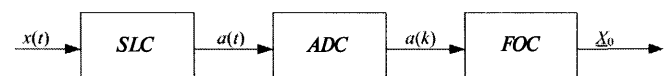


Рис. 1. Схема тракта аналого-цифрового преобразования оценки информационной слагаемой: SLC – селективный преобразователь уровня; ADC – аналого-цифровой преобразователь; FOC – фильтр ортогональных составляющих

$w(k)$  и преобразованные информационную слагаемую

$$a_0(k) = A_0 \sin(k\omega_0 T_s + \psi_0) = k_0 X_0 \sin(k\omega_0 T_s + \psi_0) \quad (2)$$

и гармонический шум

$$a_p(k) = A_p \sin(k\omega_p T_s + \psi_p) = k_p X_p \sin(k\omega_p T_s + \psi_p). \quad (3)$$

Дискретное время  $k$  связано с непрерывным временем  $t$ :  $t = kT_s$ , где  $T_s$  – интервал дискретизации.

Введем в рассмотрение: отношение сигнал/шум входного сигнала при минимальной амплитуде  $X_{0\min}$  информационной слагаемой и максимальной амплитуде гармонического шума  $X_{p\max}$

$$SNR_x = X_{0\min} / X_{p\max}; \quad (4)$$

отношение сигнал/шум сигнала после селективного преобразователя уровня при минимальной амплитуде информационной слагаемой  $A_{0\min}$  и максимальной амплитуде гармонического шума  $A_{p\max}$

$$SNR_a = A_{0\min} / A_{p\max} \quad (5)$$

и диапазон изменения информационной слагаемой

$$D_0 = \frac{A_{p\max}}{A_{0\min}} = \frac{X_{p\max}}{X_{0\min}}. \quad (6)$$

Отметим, что диапазон  $D_0$  и отношение сигнал/шум  $SNR_x$  входного сигнала являются исходными величинами, а отношение сигнал/шум  $SNR_a$  – искомым параметром.

Используя определения (4) и (5), можно определить соотношение между искомыми коэффициентами  $k_0$  и  $k_p$  селективного преобразователя уровня:

$$n = \frac{k_0}{k_p} = \frac{A_0 / X_0}{A_p / X_p} = \frac{A_{0\min} / X_{0\min}}{A_{p\max} / X_{p\max}} = \frac{SNR_a}{SNR_x}. \quad (7)$$

Величина  $n$  характеризует фильтрующие свойства тракта АЦП. При  $n > 1$  распознавание информационной слагаемой обеспечивается только благодаря селективному преобразователю уровня, повышающему отношение сигнал/шум (5) на входе АЦП до необходимого уровня. В случае  $n < 1$  тракт АЦП способен распознать информационную слагаемую без преобразования отношения сигнал/шум входного сигнала.

Таким образом, задача проектирования тракта заключается в поиске оптимального соотношения сигнал/шум  $SNR_a$  на входе АЦП и выборе соответствующих этому соотношению параметров селективного преобразователя уровня (коэффициентов  $k_0$  и  $k_p$ ), обеспечивающих распознавание с заданной точностью информационной слагаемой (оценку комплексной амплитуды) на фоне преобладающего гармонического шума.

**Характеристики тракта АЦП информационной слагаемой.** Для релейной защиты традиционно важен учет верхней границы погрешности при определении параметров информационной слагаемой [4]. Поэтому при выводе основных соотношений, характеризующих тракт АЦП, будем исходить именно из этой предпосылки.

Наихудшие условия для распознавания информационной слагаемой будут при минимальной амплитуде  $A_{0\min}$  сигнала (2) и максимальной амплитуде  $A_{p\max}$  сигнала (3). По этой же причине шум квантования

$$w(k) = \text{esign}[a_0(k)] \quad (8)$$

принимается максимальным и совпадающим по знаку с информационной слагаемой [4, 5]. Максимальный уровень шума АЦП

$$e = \eta h \quad (9)$$

и вызван существующей неопределенностью  $\eta$  из  $(2^r - 1)$  квантов АЦП.

Здесь

$$h = \frac{A_{ADC}}{(2^r - 1)} \quad (10)$$

– вес младшего разряда АЦП;  $A_{ADC}$  – опорное напряжение АЦП;  $r$  – число значащих разрядов АЦП.

Максимально возможное значение сигнала на входе АЦП возникает при совпадении во времени амплитудных значений информационной слагаемой  $A_{0\max}$  и гармонического шума  $A_{p\max}$  (рис. 2):

$$k_e A_{ADC} = A_{0\max} + A_{p\max}, \quad (11)$$

где  $k_e$  – коэффициент эффективности использования АЦП.

Использование АЦП наиболее эффективно, когда  $k_e = 1$ . Однако в случае, когда исходные данные проекта не могут быть определены полностью, необходимо предусмотреть некоторый запас в  $A_{ADC}$ , принимая  $k_e < 1$ .

Принимая во внимание выражения (5)–(9) и (11), из (10) получим зависимость от параметров сигнала: веса младшего разряда

$$h = \frac{D_0 + SNR_a^{-1}}{k_e (2^r - 1)} A_{0\min} = z A_{0\min}$$

и шума квантования (8)

$$w(k) = z A_{0\min} \eta \text{sign}[a_0(k)], \quad (12)$$

где

$$z = \frac{D_0 + SNR_a^{-1}}{k_e (2^r - 1)}. \quad (13)$$

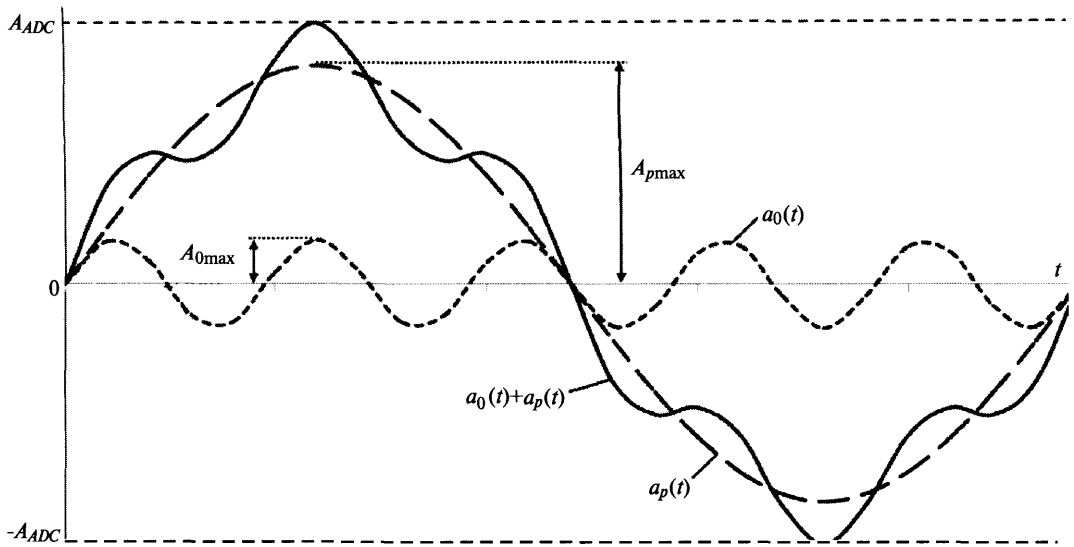


Рис. 2. Слагаемые на входе АЦП при максимальной амплитуде сигнала

В качестве фильтра ортогональных составляющих в релейной защите обычно используется фильтр Фурье [4–6]. Гармонический шум  $a_p(k)$  будет полностью подавлен фильтром Фурье, поскольку его частота обычно кратна частоте информационной слагаемой  $a_0(k)$ . Поэтому погрешность оценки комплексной амплитуды информационной слагаемой

$$\delta_0 = \left| \frac{A_{0min} - |\hat{A}_{0min}|}{A_{0min}} \right|$$

будет зависеть только от шума квантования (12). Действительно, оценка комплексной амплитуды информационной слагаемой

$$\hat{A}_{0min} = A_{0min} \left( 1 + \frac{4}{\pi} \varepsilon \eta \right) (\cos \psi_0 + j \sin \psi_0), \quad (14)$$

полученная после преобразования фильтром Фурье сигнала (1) с учетом (12), а также (2) и (3) при  $A_0 = A_{0min}$  и  $A_p = A_{pmax}$ , содержит смещение, вызванное только шумом квантования. Рассматривая совместно (13) и (14), определяем уравнение, связывающее характеристики тракта преобразования с требуемой точностью  $\delta_0$  распознавания информационной слагаемой:

$$SNR_a^{-1} = \frac{k_e \delta_0 (2^r - 1) \pi}{4\eta} - D_0. \quad (15)$$

Выражая максимально возможную амплитуду сигнала на входе АЦП из (11) через коэффициенты  $k_0$  и  $k_p$  селективного преобразователя уровня с учетом характеристик сигнала (4)–(7)

$$A_{ADC} = \frac{1}{k_e} (k_p X_{pmax} + k_0 X_{0max}) =$$

$$= \frac{1}{k_e} k_p X_{pmax} \left( 1 + \frac{k_0 X_{0min} X_{0max}}{k_p X_{pmax} X_{0min}} \right),$$

получаем коэффициент подавления гармонического шума

$$k_p = \frac{k_e D_{ADC}}{(1 + D_0 SNR_a)}, \quad (16)$$

где

$$D_{ADC} = \frac{A_{ADC}}{X_{pmax}} \quad (17)$$

– диапазон АЦП по гармоническому шуму.

Тогда коэффициент усиления информационной слагаемой определяется из (7) как

$$k_0 = SNR_a SNR_x^{-1} k_p. \quad (18)$$

**Пример.** Используем изложенный метод проектирования тракта при разработке защиты от замыканий на землю в статоре генератора, использующей в качестве информационной слагаемой напряжение третьей гармоники.

*Исходные данные:*

рабочий диапазон амплитуды информационной слагаемой – напряжения третьей гармоники: 0,2÷10 В ( $X_{0min} = 0,2$  В;  $X_{0max} = 10$  В);

диапазон амплитуды гармонического шума – напряжения первой гармоники: 0,2÷150 В ( $X_{pmin} = 0,2$  В;  $X_{pmax} = 150$  В);

погрешность оценки амплитуды информационной слагаемой не более 5% ( $\delta_0 = 0,05$ );

разрядность АЦП: 16 (число значащих разрядов  $r = 15$ );

погрешность АЦП не превышает 3 квантов ( $\eta = 3$ );

опорное напряжение АЦП:  $10\text{В}$  ( $A_{ADC} = 10\text{В}$ );

коэффициент эффективности АЦП:  $k_e = 1$ .

Рассчитываются:

диапазон изменения информационной слагаемой (6):  $D_0 = 50$ ;

отношение сигнал/шум на входе тракта (4):  $SNR_x^{-1} = 750$ ;

диапазон АЦП по гармоническому шуму (17):  $D_{ADC} = 0,067$ ;

отношение сигнал/шум на входе АЦП (15):  $SNR_a^{-1} = 271,69$ ;

коэффициент передачи гармонического шума (16):  $k_p = 0,0566$ ;

коэффициент передачи информационной слагаемой (18):  $k_0 = 0,156$ .

Из (7) получаем  $n = 2,756$ ; это показывает, что для обеспечения необходимой точности при заданных исходных данных тракт АЦП цифровой системы релейной защиты должен усилить отношение сигнал/шум более чем в 2,756 раза.

Нормированная АЧХ аналогового фильтра проектируемого тракта АЦП при частоте дискретизации  $f_s = 1200$  представлена на рис. 3. Характеристика нормирована относительно коэффициента передачи  $k_0$  на частоте 3-й гармоники. Необходимое преобразование уровня входного сигнала осуществляется с помощью аттенюатора (делителя напряжения) с коэффициентом передачи  $k_a = k_0 = 0,156$ . К АЧХ аналогового фильтра были предъявлены следующие требования:  $H(50\text{ Гц}) = 1/n = 1/2,756 = 0,363$ ;  $H(135\text{ Гц}) \geq 0,95$ ;  $H(150\text{ Гц}) = 1,0$ ;  $H(165\text{ Гц}) \geq 0,95$ ;  $H(600\text{ Гц}) \leq 0,30$ .

Коэффициент передачи на частоте 600 Гц выбран, исходя из требований по подавлению составляющих частотой выше частоты Найквиста, а на частотах 135 и 165 Гц — исходя из обеспечения 5%-й точности при отклонении частоты сети от номинальной на  $\pm 5\text{ Гц}$ .

**Вывод.** Распознавание информационной слагаемой с гарантированной точностью на фоне преобладающего гармонического шума может быть обеспечено благодаря включению в тракт АЦП селективного преобразователя, повышающего отношение сигнал/шум в результате преобразования входного сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кискачи В.М. Использование гармоник ЭДС генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю. — Электричество, 1974, №2, с. 24–29.
2. Вайнштейн Р.А., Юдин С.М., Доронин А.В., Наумов А.М. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов

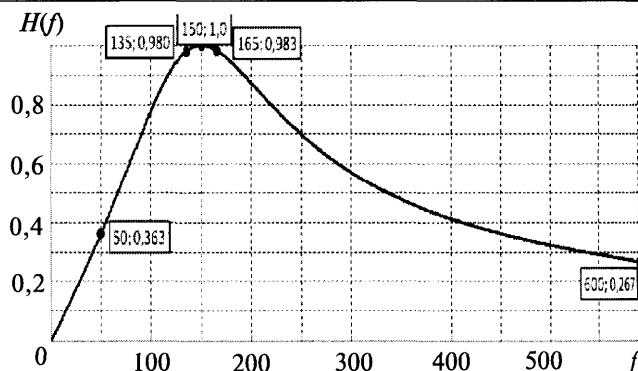


Рис. 3. Нормированная АЧХ аналогового фильтра

при различных первичных схемах. — Релейная защита и автоматизация, 2012, № 1, с. 26–31.

3. IEEE Std C37.102–2006. IEEE Guide for AC Generator Protection. February, 16, 2007.

4. Антонов В.И., Сидряков Е.В., Шевцов В.М. Выбор частоты дискретизации и разрядности аналого-цифрового преобразователя в цифровых системах релейной защиты. — Электротехника, 1993, №4, с. 56–59.

5. Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Погрешности замера параметров по ортогональным составляющим электрических величин при аддитивных помехах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1988, №10, с. 33–38.

6. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Фомин А.И. Алгоритмы Фурье для быстродействующих цифровых защит. — Сб. тез. и докл. Междунар. научно-практ. конф. и выставки «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО-2012), Чебоксары, 17–20 апреля 2012 г., с. 75–76.

[07.10.13]

*Авторы: Антонов Владислав Иванович окончил в 1978 г. электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета (ЧГУ). В 1985 г. защитил в Ленинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование новых принципов построения измерительных органов направленных защит линий электропередачи». Доцент кафедры теоретических основ электротехники, релейной защиты и автоматики ЧГУ. Главный специалист отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».*

*Наумов Владимир Александрович окончил в 2002 г. магистратуру электроэнергетического факультета ЧГУ. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Директор по развитию ООО НПП «ЭКРА».*

*Солдатов Александр Вячеславович окончил в 2006 г. электроэнергетический факультет ЧГУ. Заведующий сектором отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».*

*Егоров Николай Васильевич окончил в 2012 г. электроэнергетический факультет ЧГУ. Инженер-отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».*

# Estimating the Electrical Machine Harmonic Component against a Background of Predominant Harmonic Noise

V.I. ANTONOV, V.A. NAUMOV, A.V. SOLDATOV, AND N.V. EGOROV

*In networks with an insulated or a compensated neutral, the harmonic component arising in the single-phase ground fault circuit is used as an information component for relay protection. The level of this information component is well below the level of the fundamental network voltage harmonic component, which in this case behaves as harmonic noise. As a result, the information component is often undetectable for the protection analog-to-digital conversion (ADC) path.*

*An ADC path arrangement for a digital protection system is proposed that is intended for recognizing the electrical machine weak harmonic component against the background of predominant harmonic noise. The path resolution capacity is investigated, and a procedure for selecting the path elements optimal from the viewpoint of achieving the required accuracy of estimating the information component is presented.*

**Key words:** relay protection, analog-to-digital conversion, harmonic noise, weak harmonic components, estimation

## REFERENCES

1. Kiskachi V.M. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1974, № 2, pp. 24–29.
2. Vainshtein R.A., Yudin S.M., Doronin A.V., Naumov A.M. *Releinyazashchita i avtomatizatsiya (Relay Protection and Automation)*, 2012, № 1, pp. 26–31.
3. IEEE Std C37. 102–2006. IEEE Guide for AC Generator Protection. February, 16, 2007.
4. Antonov V.I., Sidiryakov Ye.V., Shevtsov V.M. *Elektrotekhnika (Electrical Engineering)*, 1993, № 4, pp 56–59.
5. Lyamets Yu.Ya., Il'in V.A. *Izv. vysov. Elektromekhanika (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 1998, № 10, pp. 33–38.
6. Antonov V.I., Naumov V.A., Soldatov A.V., Fomin A.I. *Sb. Docl. Mezhdunar. Nauchno-practich. konf. i vystavki «Releynaya zashchita i avtomatizatsiya elektroenergeticheskikh system Rossii (RELAVESPO-2012) (Proc. of the Intern. Conf. «Relay Protection and Automation of the Russia Electric Power Systems»)*. Cheboksary, April 17–20, 2012, pp. 75–76.

*Authors: Antonov Vladislav Ivanovich graduated from the Chuvash State University (ChSU) in 1978. In 1985 he received the degree of Candidate Techn. Sci. from the Leningrad Polytechnical Institute. He is a Lecturer in the Department «Theoretical Fundamentals, of Electrical Engineering, Relay Protection and Automation» of the ChSU and Chief Expert in the Department in the Limited Liability Company (LLC) «Ekra».*

*Naumov Vladimir Aleksandrovich graduated from the magistracy of the ChSU in 2002. In 2005 he received the degree of Candidate Techn. Sci. from VNIIE. He is Manager by the Development of the LLC «Ekra».*

*Soldatov Aleksandr Vyacheslavovich graduated from ChSU in 2006. He is Head of the Sector at the Department in the LLC «Ekra».*

*Yegorov Nikolai Vasil'yevich graduated from ChSU in 2012. He is Engineer of the LLC «Ekra».*