

П. Д. Кутейников

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЕТИ НА ТОЧНОСТЬ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТЫ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

suhanov.pavel@inbox.ru

Частота является одним из основных параметров энергосистемы. Отклонение частоты связано с нарушением баланса мощности в энергосистеме и приводит снижению эффективности ее работы и даже к остановке. Для контроля частоты в энергосистемах используются реле частоты различных конструкций. Для повышения точности и надежности контроля частоты было разработано адаптивное реле частоты, которое перед обработкой сетевого сигнала осуществляет автоматическую стабилизацию. Однако искажение формы сигнала, вызванное гармоническими составляющими, является источниками погрешности контроля частоты. Исследованию влиянию гармонических составляющих на точность контроля частоты посвящена эта статья.

Дополнительно получены зависимости инструментальной и методической погрешностей от амплитуды напряжения и от количества гармоник, которые учитываются при расчете. По зависимостям наглядно прослеживается зависимость – уменьшение инструментальной погрешности при росте амплитуды и количества гармоник, но увеличение методической погрешности при увеличении количества гармоник и амплитуды напряжения.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, реле частоты, метрологический анализ, инструментальная погрешность, методическая погрешность

P. D. Kuteynikov

STUDY OF THE NETWORK HARMONIC COMPONENTS INFLUENCE ON THE FREQUENCY CONTROL ACCURACY

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Frequency is one of the main parameters of a power system. Frequency deviations are associated with an imbalance in the power system and lead to reduced efficiency and shutdown. Frequency relays of various designs are used to monitor frequency in power systems. To improve the accuracy and reliability of frequency monitoring, an adaptive frequency relay that automatically stabilizes the system before processing the network signal was developed. However, signal distortion caused by harmonic components is a source of frequency monitoring error. This article examines the influence of harmonic components on frequency monitoring accuracy.

Additionally, dependences of instrumental and methodological errors on voltage amplitude and the number of harmonics considered in the calculation were obtained. These dependences clearly demonstrate a relation: instrumental error decreases with increasing amplitude and the number of harmonics, but methodological error increases with increasing the number of harmonics and voltage amplitude.

Keywords: power supply reliability, frequency relay, metrological calculation, instrumental error, methodical error of microprocessor relays

Введение

Частота является одним из основных параметров энергосистемы. Отклонение частоты связано с нарушением баланса мощности в энергосистеме и приводит к снижению эффективности ее работы и даже к остановке. Для контроля частоты в энергосистемах используются реле частоты различных конструкций. Для повышения точности и надежности контроля частоты было разработано адаптивное реле частоты, которое перед обработкой сетевого сигнала осуществляет автоматическую стабилизацию. Однако искажение формы сигнала, вызванное гармоническими составляющими, является источниками погрешности контроля частоты.

В настоящее время в электроэнергетике качество электроэнергии регулируется ГОСТами [1], в которых диапазон отклонения частоты сети рекомендован $\pm 0,2-0,4$ Гц.

К нарушениям показателей качества электроэнергии относятся такие явления, как провалы, кратковременные прерывания и отклонения напряжения, искажение формы тока/напряжения, отклонение частоты и др. [2]. Данные явления отрицательно влияют на работу электрооборудования и электроприборов, в том числе и измерительных.

Влияние гармонических искажений

Источниками гармонических составляющих в сети являются нелинейные и импульсные потребители [2]. Высшие гармоники приводят к дополнительным энергетическим потерям в электрических машинах, трансформаторах

и сетях. Кроме того, гармонические составляющие затрудняют компенсацию реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов [3; 4].

Отдельного рассмотрения заслуживают гармоники, кратные 3 (3-я, 6-я, 9-я и др.). Данные гармоники оказывают сильное влияние на системы с заземленной нейтралью, которые широко распространены в России при уровне напряжения 6–35 кВ. Эти гармоники совпадают по фазе и приводят к возникновению тока в нейтральном проводнике и, как следствие, его перегреву и возгоранию [2; 5]. Присутствие 5-й гармоники в системе приводит к возникновению в трехфазных индуктивных двигателях тормозящего момента, поскольку эта составляющая вызывает отрицательный крутящий момент, который стремится вращать двигатель в обратную сторону. В результате потребляется больше мощности, и двигатель постепенно перегревается. Она также может вызывать резонансные явления в сети [6].

В дополнение к вышеуказанным последствиям появления гармоник в сети, они также вызывают искажения показаний и сигналов измерительных приборов, таких как реле. Поскольку реле является основным элементом в системах управления энергосистемой, то погрешность контроля может привести к негативным последствиям.

Адаптивный преобразователь частоты и напряжения

Авторами [7; 8] предложен вариант конструкции адаптивного преобразователя частоты и напряжения для мониторинга этих двух параметров (рис. 1).

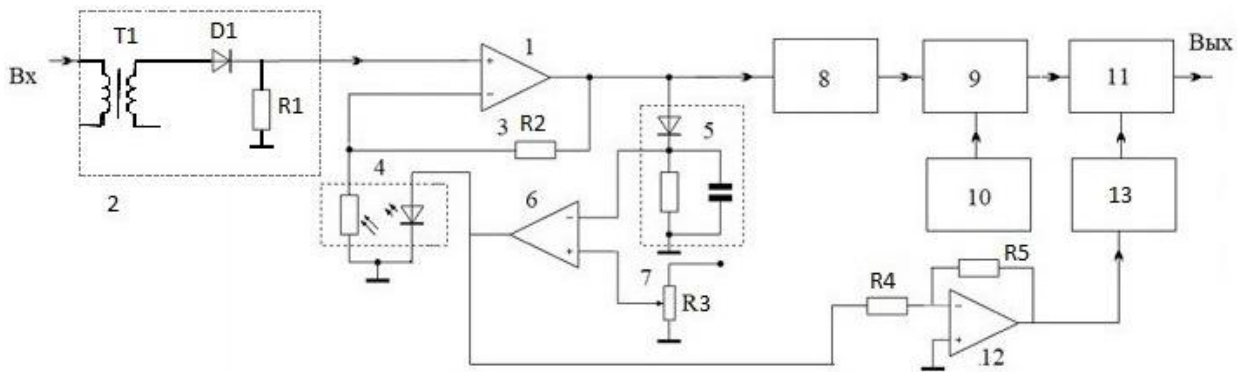


Рис. 1. Схема адаптивного преобразователя частоты и минимального напряжения

Принцип действия данного устройства заключается в следующем: на вход операционного усилителя 1 через измерительный трансформатор с однополупериодным выпрямителем 2 подается сетевое напряжение. Выпрямитель преобразует двухполярный сигнал входного напряжения в однополярный. Далее от усилителя сигнал поступает на вход пик-детектора 5, функция которого заключается в преобразовании сигнала из импульсного в постоянный с амплитудой, равной амплитуде напряжения. Напряжение (постоянное) после пик-детектора направляется на инвертирующий контакт сравнительного элемента 6. На неинвертирующий контакт этого же элемента подается напряжение с задающего устройства 7. В элементе сравнения имеется усилитель, который усиливает разность двух напряжений, которая направляется на управляющий вход сопротивления 4, изменяя значение сопротивления до момента, пока напряжения не будут равными (с учетом некоторой ошибки). Также с выхода усилителя напряжение направляется на формирователь импульсов 8, функция которого заключается в преобразовании сигнала из синусоидального в прямоугольный импульс, который, с помощью ключа 9 заполняется еще большим числом импульсов более высокой частоты, подающихся генератором тактовых импульсов 10. Их количество зависит от периода сети (пропорционально). После прохождения через ключ импульсы направляются на счетчик импульсов микроконтроллера 11, после чего их количество преобразуется в цифру. Дополнительно, к выходу операционного усилителя сравнительного элемента, подключен масштабный операционный усилитель 12, функция которого заключается в регистрации сигнала, пропорционального отклонению напряжения от номинального значения с коэффи-

циентом усиления согласно тарифовке. Сигнал с операционного усилителя поступает на аналого-цифровой преобразователь 14, после чего уже в цифровой форме поступает на микроконтроллер, который, в свою очередь, соответствующе реагирует на него [8].

Все измерительные приборы обладают методическими и инструментальными погрешностями. Инструментальная погрешность обусловлена несовершенством средства измерения. Ее источником могут служить производственные дефекты, неточности конструкции или погрешности самой конструкции прибора, например, отклонение шкал и чувствительных элементов от идеала [9].

Из [10] известно, что инструментальная погрешность измерения для представленного выше прибора вычисляется по формуле:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{ш}}{K_{фр}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{ш}$ – среднее квадратичное значение напряжения шумов на входе формирователя импульсов, $K_{фр}$ – крутизна фронта импульса на уровне срабатывания формирователя импульсов. Крутизну фронта импульса вычисляли как производную напряжения в точке, равной половине амплитуды ($0,5U_m$). В данной точке она составит $K_{фр} = 270$ (в относительных единицах), а среднее квадратичное значение шумов составит $\sigma_{ш} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ В}$. Отсюда $\sigma_T = 1,78 \cdot 10^{-3} \%$ [10].

Но на данный прибор, как и на все другие, оказывают влияние также и гармонические искажения напряжения в сети. Из-за них сигнал напряжения становится несинусоидальным, приобретает сложную форму. Разложение в ряд Фурье позволяет представить данную кривую сложной формы в виде нескольких простых синусоид [2].

Оценим влияние гармонических искажений на вышеуказанное устройство. Для удобства учитывается влияние 1, 3 и 5 гармоник. Разложение в ряд Фурье напряжения сети будет иметь вид:

$$U(t) = U_1 \sin(\omega t) + U_3 \sin(3\omega t) + U_5 \sin(5\omega t), \quad (2)$$

где $U_1 = 1$ (в относительных единицах), $U_n = \frac{U_1}{n}$,
 $\omega = 2\pi f$, f – частота сети ($f = 50 \text{ Гц}$).

Для наглядности представим формулу (2) в виде графика (рис. 2):

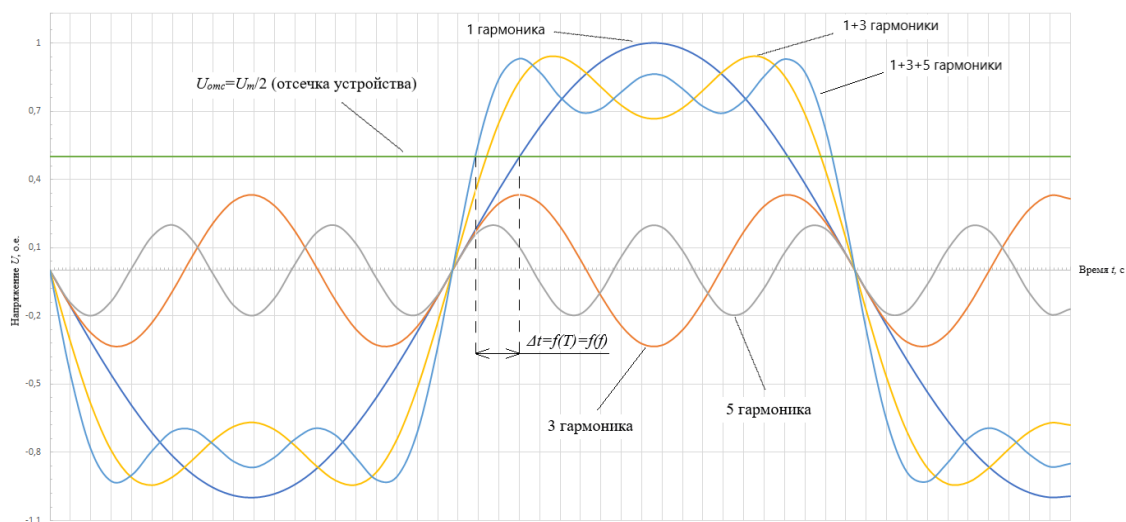


Рис. 2. График разложения напряжения сети в ряд Фурье

В связи с особенностью адаптивного преобразователя нас интересует только часть графика в положительной плоскости.

По графику суммы 1, 3 и 5 гармоник видно, что крутизна фронта увеличилась, но невозможно точно определить инструментальную погрешность аналитическим методом. Поэтому воспользуемся графиком для определения методической погрешности.

Методическая погрешность является результатом несовершенства метода проведения измерения. Она не зависит от погрешности самого средства измерения (прибора), а является следствием используемого метода измерения [11].

Методическая погрешность (Δt) показана на рис. 2. В результате расчета численным методом (принимая величину частоты $f = 50 \text{ Гц}$ и, как следствие, период $T = 0,02 \text{ с}$) погрешность $\Delta t = 0,0011 \text{ с} = 5,55 \%$. Методическая погрешность времени, как функции от периода (и частоты) увеличивается с увеличением «ширины» функции – в случае учета гармонических искажений.

Данный факт говорит о том, что гармонические искажения негативно влияют на адаптивный преобразователь частоты и напряжения,

увеличивая погрешность измерений. Можно сделать вывод о необходимости использования в приборе устройств для фильтрации гармонических искажений с целью исключения негативного воздействия на погрешность измерений.

Поскольку расчет велся в относительных единицах, выявленную закономерность можно использовать для любого значения амплитуды напряжения сети и получить погрешность для частного случая параметров сети. Были построены зависимости значения инструментальной и методической погрешностей от амплитуды напряжения (рис. 3 и 4).

Для графика методической погрешности в случае суммы 1 и 3 гармоник изменялись амплитудные значения 3 гармоники при неизменном значении амплитуды 1 гармоники, а в случае суммы 1, 3 и 5 гармоник изменялись значения амплитуды 5 гармоники при неизменных 1 и 3.

На построенных зависимостях можно заметить закономерность: с ростом амплитуды напряжения значение инструментальной погрешности уменьшается. Также по графикам видно, что инструментальная погрешность уменьшается с ростом количества гармоник, которые учитываются при расчете.

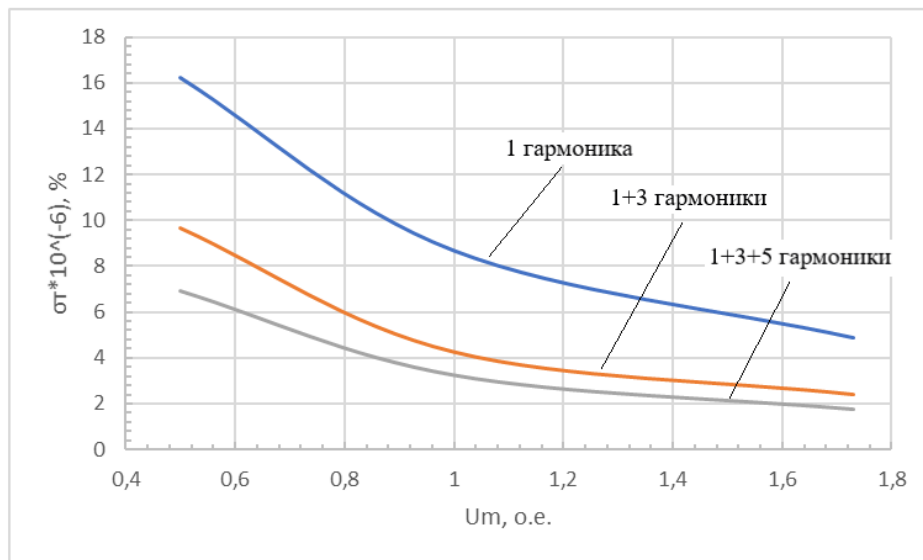


Рис. 3. Зависимость инструментальной погрешности от амплитуды напряжения

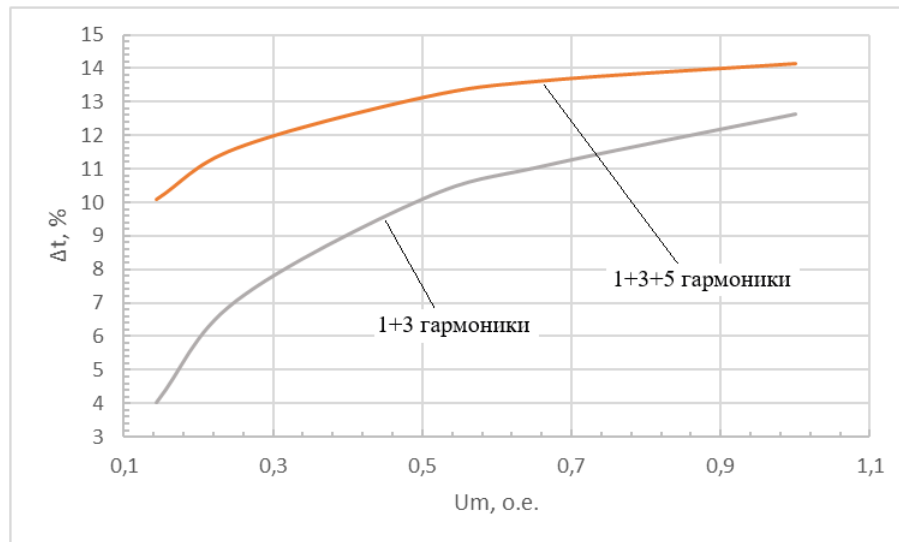


Рис. 4. Зависимость методической погрешности от амплитуды напряжения

В случае же методической погрешности можно заметить тенденцию ее роста с увеличением амплитуды гармоник, отличных от основной (в нашем случае 3 и 5), причем изменение амплитуды 3 гармоники оказывает большее влияние на значение погрешности, по сравнению с 5. Также заметно, что с увеличением количества гармоник, которые учитываются при расчете, увеличивается и значение погрешности.

Вывод

В данной статье приведен анализ влияния гармонических искажений напряжения на погрешность измерения адаптивного реле частоты и напряжения, построен график напряжения сети с учетом 1, 3 и 5 гармоник и произведено

его разбиение на гармонические составляющие посредством разложения в ряд Фурье.

Анализ графиков показал, что учет гармонических искажений напряжения сети уменьшает инструментальную погрешность в связи с увеличением величины крутизны фронта, но увеличивает методическую погрешность ($\Delta t = 5,5\%$), тем самым уменьшая точность и надежность прибора. Данное воздействие может быть компенсировано при помощи устройств для фильтрации гармонических искажений.

Дополнительно получены зависимости инструментальной и методической погрешностей от амплитуды напряжения и от количества гармоник, которые учитываются при расчете.

По зависимостям наглядно прослеживается зависимость – уменьшение инструментальной погрешности при росте амплитуды и количества гармоник, но увеличение методической погрешности при увеличении количества гармоник и амплитуды напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
2. *Блинов, Ю. И.* Современные энергосберегающие электротехнологии / Ю. И. Блинов, А. С. Васильев, А. Н. Никаноров и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 548 с.
3. *Жежеленко, И. В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: 4-е изд., перераб. и доп. / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
4. *Волков, Н. Г.* Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н. Г. Волков. – Томск: Томский политехнический университет, 2010.
5. Режим доступа: <https://glavproekt.com/inzheneram/vliyanie-garmonik-napryazheniya-i-toka/> - электронный ресурс (01.10.2025).
6. Режим доступа: [https://www.metrel.si/assets/Metrel/PDF_dokumentacija/Application_notes/Single_application_no](https://www.metrel.si/assets/Metrel/PDF_dokumentacija/Application_notes/Single_application_notes/Application_notes_Current_harmonics.pdf)tes/Application_notes_Current_harmonics.pdf - электронный ресурс (01.10.2025).
7. Патент на полезную модель № 232761 U1 Российская Федерация, МПК H01H 47/20, H01H 47/08. реле частоты: заявл. 27.12.2024; опубл. 19.03.2025 / А. Н. Шилин, В. М. Власов, П. Д. Кутейников; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – EDN CFMTUO.
8. Патент на полезную модель № 236673 U1 Российская Федерация, МПК H01H 47/28, реле частоты: заявл. 23.06.2025; опубл. 18.08.2025 / А. Н. Шилин, П. Д. Кутейников, В. М. Власов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – EDN RFGWQJ.
9. *Неверов, А. Н.* Основы теории погрешностей: учебно-методическое пособие по курсу «Взаимозаменяемость и технические измерения» / сост.: А. Н. Неверов. – М.: МАДИ, 2021. – 58 с.
10. *Шилин, А. Н.* Адаптивный преобразователь частоты сети для релейной защиты систем электроснабжения / А. Н. Шилин, П. В. Дикарев, П. Д. Кутейников, В. М. Власов // Контроль. Диагностика. – 2025. – Т. 28, № 6(324). – С. 26–30. – DOI 10.14489/td.2025.06.pp.026-030. – EDN CCNKCB.
11. *Дерябина, М. Ю.* Основы измерений: учебное пособие для студентов спец. Т.13.01 «Метрология, стандартизация и сертификация» / М. Ю. Дерябина; Мво образования РБ; УО БГУИР; Кафедра метрологии и стандартизации. – Минск: БГУИР, 2001. – 58 с.