

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.317

Г.И. Коробко, В.В. Лебедев, С.В. Попов

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Волжская государственная академия водного транспорта

Цель: Разработка и исследование устройства выделения сигнала нелинейных искажений сетевого напряжения автономных электростанций.

Методы исследования: Аналитический расчет и моделирование в пакете программ Matlab Simulink.

Результаты: Определены параметры сигнала для компенсации фазового сдвига выходного напряжения фильтра при изменении частоты сетевого напряжения. Разработана структурная схема и модель устройства выделения сигнала нелинейных искажений.

Вывод: Предложенное устройство обеспечивает высокую точность выделения сигнала нелинейных искажений в статических и динамических режимах работы автономной электростанции. Разработанная модель может быть применена при моделировании устройств компенсации нелинейных искажений напряжения.

Ключевые слова: автономные электростанции, нелинейные искажения напряжения, качество электроэнергии, изменение частоты напряжения, изменение амплитуды напряжения.

Работа автономной электростанции, в том числе и судовой, в составе которой имеются мощные нелинейные потребители, сопровождается значительным искажением сетевого напряжения. К таким потребителям относятся статические преобразователи (управляемые и неуправляемые выпрямители, преобразователи частоты), светотехническое оборудование и др. Их питание от сети соизмеримой мощности приводит к генерации в сеть высших гармоник тока, которые создают на импедансах сети падения напряжения, искажающие форму сетевого напряжения. Наличие в сети высших гармоник негативно сказывается на работе генераторов, трансформаторов и электродвигателей, создавая в них дополнительные потери и снижая коэффициент мощности, что приводит к их перегреву и повышенной вибрации [1, 2].

Для снижения величины нелинейных искажений напряжения повышают число фаз выпрямления преобразователей, используют пассивные сетевые и резонансные фильтры, силовые активные фильтры и активные выпрямители. Однако все перечисленные способы требуют усложнения схем, использования мощных силовых согласующих устройств и другого оборудования. Это ведет к увеличению массогабаритных показателей, сравнительно дорого и зачастую неэффективно.

Уровень высших гармоник можно снизить, используя вольтодобавочный компенсатор, функциональная схема которого для одной фазы представлена на рис. 1.

Источник электроэнергии (генератор G) питает линейную нагрузку ЛН и через последовательно включенную обмотку вольтодобавочного трансформатора T статический преобразователь СП, который является источником нелинейных искажений напряжения.

Устройство управления УУ выделяет из напряжения сети U_C сигнал суммы высших гармоник U_Σ , который после усиления в широтно-импульсном преобразователе ШИП поступает на первичную обмотку вольтодобавочного трансформатора T . Последний передает

напряжение вольтодобавки в сеть в противофазе, чем обеспечивается компенсация нелинейных искажений. Питание ШИП осуществляется от источника (ИП), представляющего собой трехфазный мостовой выпрямитель, подключенный к сети со стороны нелинейной нагрузки.

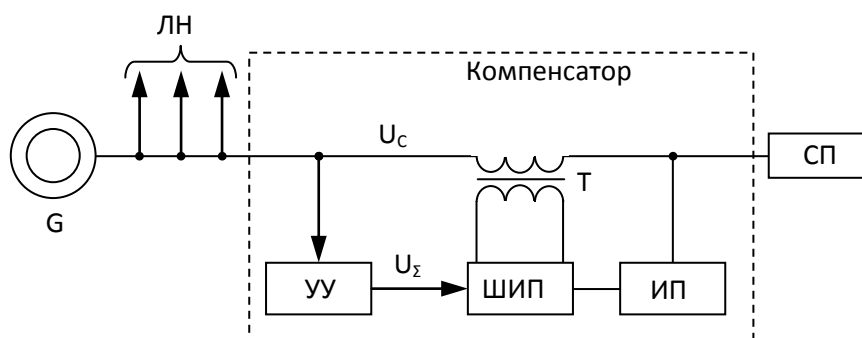


Рис. 1. Функциональная схема компенсатора нелинейных искажений напряжения

Одним из основных факторов, влияющих на степень компенсации нелинейных искажений напряжения, является точность выделения сигнала суммы высших гармоник. Решение данной задачи осложняется тем, что работа любой автономной электростанции сопровождается значительными отклонениями амплитуды и частоты сетевого напряжения. Причиной этого является включение и отключение потребителей, мощность которых соизмерима с мощностью электростанции. Поскольку принцип выделения сигнала U_{Σ} заключается в подавлении основной гармоники сетевого напряжения, отклонения частоты и амплитуды напряжения сети как в статических, так и в динамических режимах, должны обязательно учитываться при построении УУ.

Один из вариантов устройства управления основан на использовании генератора эталонного синусоидального напряжения (ГЭСН) [3], выходной сигнал которого вычитается из сигнала напряжения сети. Результирующий сигнал будет содержать только сумму высших гармоник сетевого напряжения. Однако, чтобы получить высокую точность выделения сигнала суммы, необходимо написание и реализация сложного алгоритма, обеспечивающего синхронизацию эталонного напряжения с напряжением сети по частоте и амплитуде основной гармоники. Измерение сетевого напряжения и формирование сигнала U_{Σ} требует применения быстродействующих АЦП и ЦАП, что приводит к значительному удорожанию всей системы.

Устройство управления может быть реализовано на базе фильтра низких частот (ФНЧ), например, фильтра Баттерворта 8-го порядка. Такой фильтр характеризуется отсутствием пульсаций АЧХ в полосе пропускания и ее быстрым спадом в полосе заграждения, поэтому эффективно подавляет все высшие гармоники в напряжении сети. Настраивается фильтр таким образом, чтобы коэффициент его передачи на частоте 50 Гц был равен единице, а фазовый сдвиг выходного напряжения составлял 180° . В результате сложения напряжений сети и фильтра основная гармоника полностью компенсируется, а результирующий сигнал U_{Σ} содержит только сумму высших гармоник напряжения. Точность формирования сигнала U_{Σ} не зависит от амплитуды сетевого напряжения, однако изменение частоты приведет к появлению в выходном сигнале фильтра дополнительного фазового сдвига. Поэтому в составе сигнала управления появляется основная гармоника, амплитуда которой будет пропорциональна отклонению частоты. На рис. 2 показано изменение амплитуды основной гармоники сетевого напряжения в выходном сигнале U_{Σ} (кривая 2) при возрастании частоты сети от 50 до 52,5 Гц (кривая 1).

Анализ диаграммы показывает, что процентное содержание первой гармоники увеличилось с 0,2 до 30% от номинального значения. Следовательно, в состав устройства управления необходимо ввести канал компенсации фазового сдвига при отклонении частоты [4]. В качестве компенсирующего сигнала можно использовать линейное напряжение двух других

фаз, величина которого дозируется сигналом отклонения частоты дизель-генераторного агрегата от номинального значения.

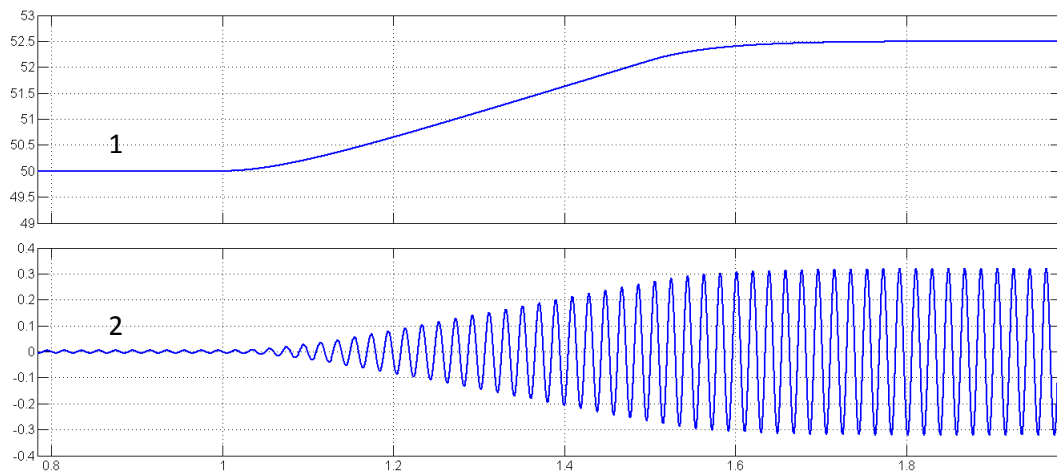


Рис. 2. Изменение амплитуды основной гармоники при нарастании частоты сетевого напряжения

Исследование устройства управления на базе ФНЧ с каналом компенсации фазового сдвига показало высокую точность выделения сигнала суммы высших гармоник в установленных режимах работы СЭЭС. Несмотря на это, такое устройство обладает рядом существенных недостатков. Прежде всего, использование фильтра высокого порядка требует точной настройки параметров для обеспечения необходимых частотных характеристик. Коэффициент, дозирующий сигнал компенсации фазового сдвига, нуждается в дополнительной корректировке в зависимости от отклонения частоты сетевого напряжения, что обусловлено нелинейностью ФЧХ фильтра в зоне допустимого отклонения частоты ($50 \text{ Гц} \pm 5\%$). Кроме того, отставание выходного напряжения фильтра от напряжения сети на 180° снижает быстродействие системы компенсации нелинейных искажений и приводит к «накоплению» в сигнале U_Σ основной гармоники в динамических режимах.

Устранение указанных недостатков можно обеспечить, применив полосовой фильтр (ПФ), представляющий собой комбинацию фильтров высоких и низких частот, в качестве которых предлагается использовать фильтры Баттерворта 6-го порядка. Частотные характеристики полосового фильтра представлены на рис. 3, а.

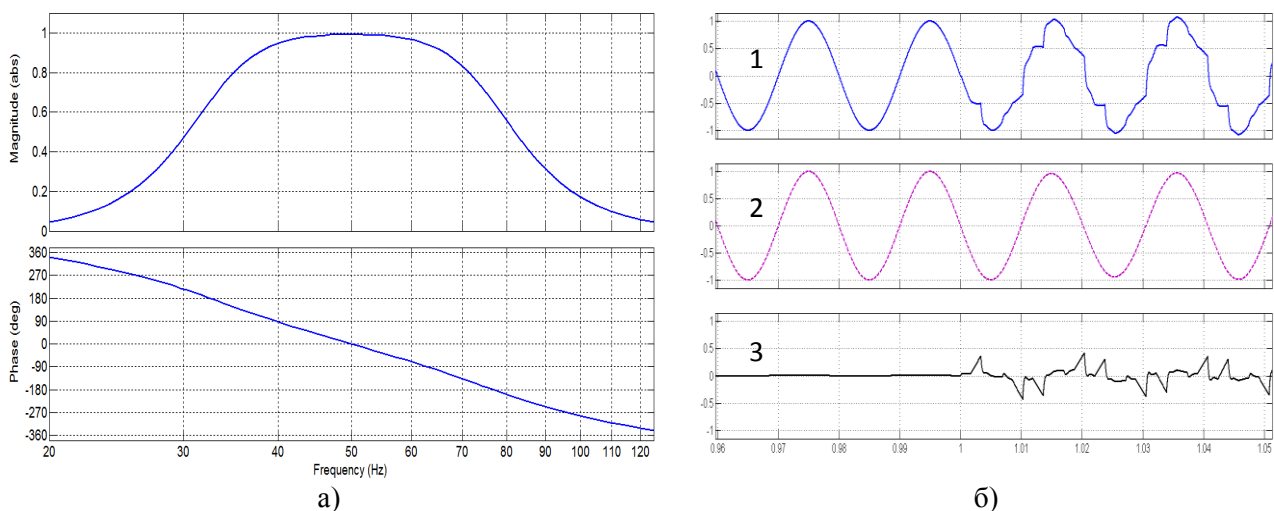


Рис. 3. Частотные характеристики полосового фильтра (а) и принцип работы устройства управления (б)

Как видно из характеристик, фазовый сдвиг выходного напряжения фильтра при номинальной частоте основной гармоники (50 Гц) равен нулю. Коэффициент передачи фильтра в зоне допустимого отклонения частоты равен единице, а ФЧХ является практически линейной. Работа УУ на базе ПФ заключается в том, что сигнал суммы высших гармоник напряжения находится как разность напряжения сети и выходного напряжения фильтра, которые при частоте 50 Гц совпадают по фазе. На рис. 3, б представлены сигналы на входе (кривая 1) и выходе (кривая 2) полосового фильтра, а также сигнал их разности (кривая 3), при отсутствии нелинейных искажений и при их появлении в момент времени, равный 1 с.

Отклонение частоты сетевого напряжения приводит к появлению фазового сдвига β выходного напряжения фильтра относительно напряжения сети. В результате в сигнале разности, как и в устройстве на базе ФНЧ, появится первая гармоника, которую необходимо скомпенсировать. Для определения структуры и параметров канала компенсации произведем расчет компенсирующего сигнала. Поскольку амплитуды напряжения сети и напряжения на выходе фильтра равны, сигнал компенсации определяется разностью:

$$U_K = \sin(\omega t) - \sin(\omega t + \beta) = 2 \sin\left(-\frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\beta}{2}\right).$$

Амплитуду входного напряжения сети будем считать равной единице.

С учетом малости φ , считая, что $\sin \varphi \approx \varphi$, получим

$$U_K = -\beta \cos\left(\omega t + \frac{\beta}{2}\right).$$

Согласно полученному выражению, сигнал компенсации должен иметь косинусоидальную форму, амплитуду пропорциональную β и фазовый сдвиг относительно входного напряжения фильтра, равный $\beta/2$. В качестве фактического сигнала компенсации используем сигнал

$$U_{K\Phi} = -\beta \cos(\omega t + \beta), \tag{1}$$

который можно получить как разность выходных напряжений аналогичных фильтров двух других фаз. Найдем разницу сигналов $U_{K\Phi}$ и U_K :

$$\Delta U_K = U_{K\Phi} - U_K = -\beta \cdot \left(\cos\left(\omega t + \frac{\beta}{2}\right) - \cos(\omega t + \beta) \right) = 2\beta \sin\left(\omega t + \frac{3\beta}{4}\right) \sin\left(-\frac{\beta}{4}\right).$$

С учетом малости β получим

$$\Delta U_K = -\frac{\beta^2}{2} \sin\left(\omega t + \frac{3\beta}{4}\right).$$

Скомпенсируем величину ΔU_K , подав дополнительный синусоидальный сигнал $\Delta U_{K\Phi}$, равный

$$\Delta U_{K\Phi} = -\frac{\beta^2}{2} \sin(\omega t + \beta). \tag{2}$$

Так как фазы требуемого и фактического компенсирующих сигналов отличаются, определим ошибку ε :

$$\varepsilon = \Delta U_{K\Phi} - \Delta U_K = -\frac{\beta^2}{2} \left(\sin\left(\omega t + \frac{3\beta}{4}\right) - \sin(\omega t + \beta) \right) = -\beta^2 \sin\left(-\frac{\beta}{8}\right) \cos\left(\omega t + \frac{7\beta}{8}\right).$$

С учетом малости β получим

$$\varepsilon = \frac{\beta^3}{8} \cos\left(\omega t + \frac{7\beta}{8}\right).$$

При $\beta = 0,3$ рад, что соответствует отклонению частоты на 5%, амплитуда основной

гармоники, в сигнале высших гармоник, составит $\approx 0.33\%$ от номинального значения. Для ее компенсации к основному сигналу (1) можно добавить сигнал:

$$\varepsilon = \frac{\beta^3}{8} \cos(\omega t + \beta). \quad (3)$$

Таким образом результирующий сигнал компенсации будет равен:

$$U_{K\Sigma} = -\left(\beta - \frac{\beta^3}{8}\right) \cos(\omega t + \beta) - \frac{\beta^2}{2} \sin(\omega t + \beta). \quad (4)$$

Функциональная схема канала компенсации, реализованная в соответствии с выражением (4), будет иметь вид, показанный на рис. 4.

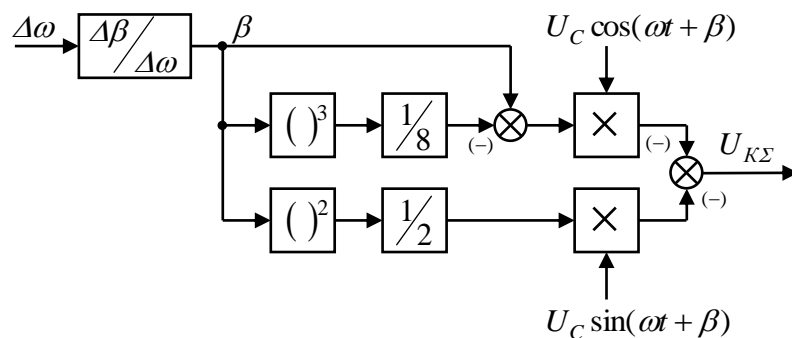


Рис. 4. Функциональная схема формирования сигнала компенсации фазового сдвига

Для исследования устройства управления на базе полосового фильтра, была разработана его модель в пакете Matlab Simulink, представленная на рис. 5. Модель показана для фазы «А», однако использует ряд блоков, входящих в каналы компенсации других фаз «В» и «С».

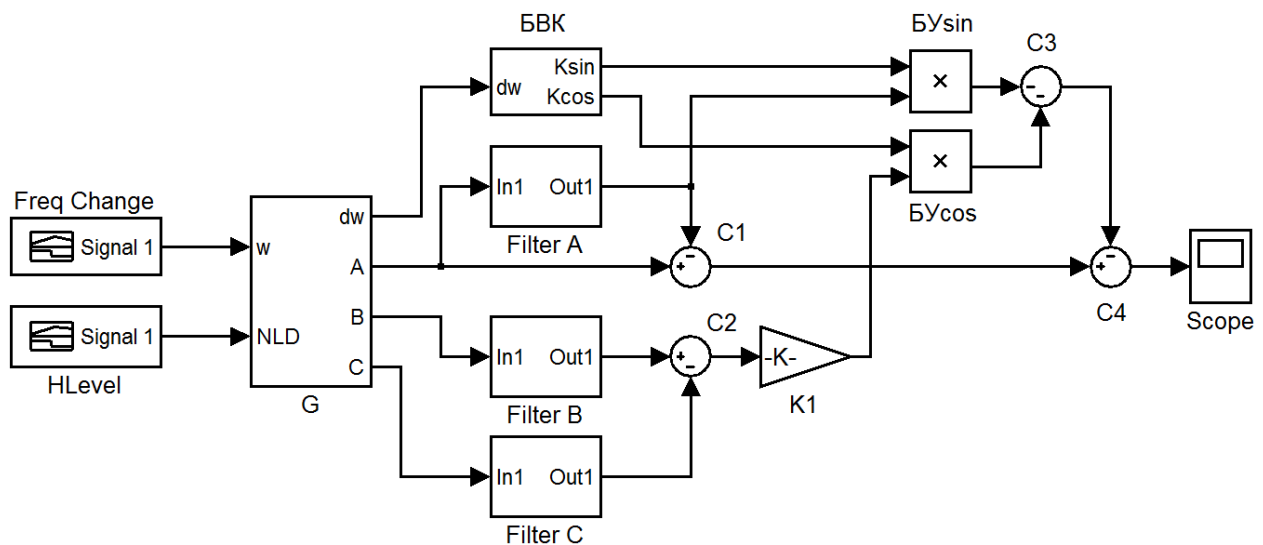


Рис. 5. Модель устройства управления

На задающий вход «w» синхронного генератора G поступает сигнал переменной скорости вращения, который формируется в о.е. блоком Freq Change. В результате на выходах «А», «В» и «С» генератора формируются фазные напряжения с изменяющейся частотой. Напряжение фазы «А» поступает на вход полосового фильтра Filter A, выходное напряжение которого в сумматоре C1 вычитается из напряжения сети. При этом на выходе C1 формиру-

ется сигнал суммы высших гармоник напряжения сети. Для исключения основной гармоники, появляющейся в нем при отклонении частоты, в модель введен канал компенсации фазового сдвига выходного напряжения фильтра, реализованный в соответствии с выражением (4). Сигнал отклонения скорости вращения генератора G , сформированный на выходе «dw», поступает на блок вычисления коэффициентов БВК. На его выходе формируются коэффициенты K_{\sin} и K_{\cos} , которые с помощью блоков умножения $БУ_{\sin}$ и $БУ_{\cos}$ дозируют синусоидальную и косинусоидальную составляющие сигнала компенсации. Последняя формируется как линейное напряжение между фазами «В» и «С» блоками Filter В, Filter С и сумматором С2. Применение фильтров позволяет исключить влияние высших гармоник напряжения на работу канала компенсации. Коэффициент $K1$ служит для приведения амплитуды линейного напряжения к амплитуде фазного напряжения сети. Результирующий сигнал компенсации формируется на выходе сумматора С3 и вычитается из сигнала суммы высших гармоник с помощью сумматора С4. Блок HLevel предназначен для задания уровня нелинейных искажений напряжения в о.е. от максимально возможного. Осциллограф Scope служит для визуализации результатов моделирования.

Критериями эффективности работы УУ являются точность выделения сигнала суммы высших гармоник и амплитуда, оставшейся в нем основной гармоники напряжения.

На рис.6а представлены результаты моделирования работы устройства управления при отклонении частоты сетевого напряжения (кривая 1). Из осциллограмм видно, что при работе УУ без канала компенсации фазового сдвига амплитуда основной гармоники значительно увеличивается (кривая 2). При увеличении и уменьшении частоты сетевого напряжения на 5%, амплитуда основной гармоники достигает 35% от номинального значения. Включение канала компенсации позволяет практически полностью подавить основную гармонику в выходном сигнале как в переходных, так и в установившихся режимах (кривая 3). Ее амплитуду можно оценить по осциллограммам, представленным на рис. б, где показано задаваемое изменение частоты сетевого напряжения в сторону увеличения (кривая 1) и уменьшения (кривая 2) и соответствующее им изменение выходного напряжения УУ (кривая 3 и 4 соответственно). Из осциллограмм видно, что амплитуда основной гармоники при отклонении частоты на 5% в ту или другую сторону не превышает 0,5% от номинального значения в установившихся режимах и 1% в переходных. Отличия выходных напряжений УУ при увеличении и уменьшении частоты сетевого напряжения объясняется неточностью настройки параметров фильтра, а также некоторой нелинейностью его ФЧХ.

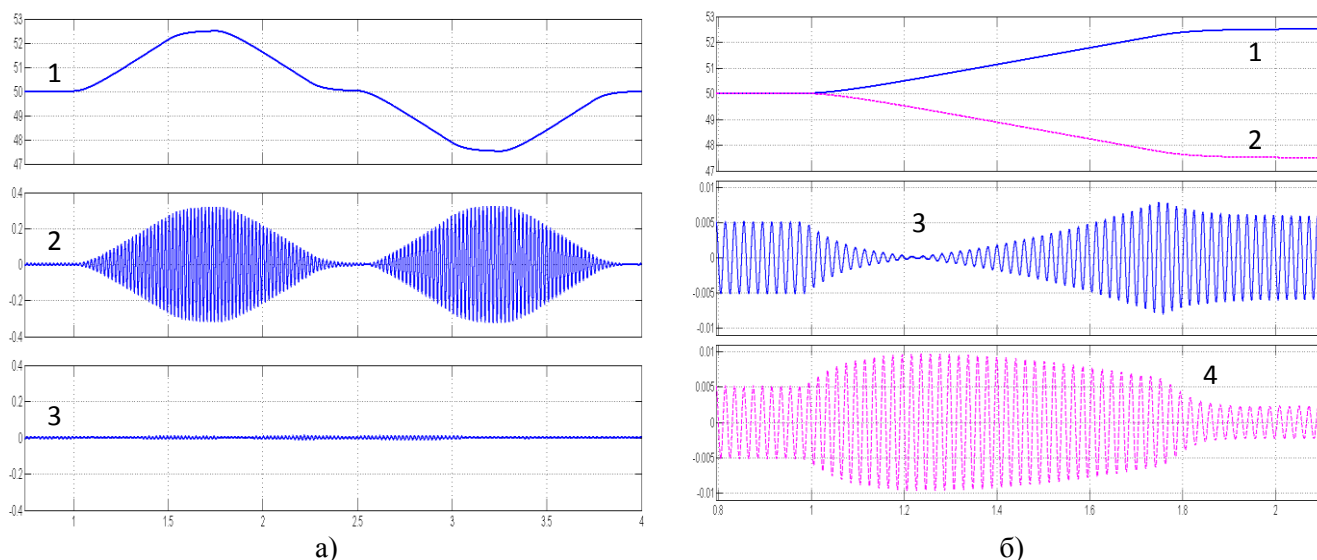


Рис. 6. Результаты моделирования работы УУ при отклонении частоты сетевого напряжения

На рис. 7 представлены результаты моделирования, позволяющие оценить точность работы устройства управления. Для этого к напряжению сети был добавлен сигнал (кривая 1), содержащий 5-ю, 7-ю, 11-ю и 13-ю гармоники, амплитуды которых составили 20, 14, 9 и 7,7% от основной гармоники соответственно. После вычитания из этого сигнала напряжения U_{Σ} (кривая 2) был получен сигнал разности (кривая 3), характеризующий неточность выделения сигнала суммы высших гармоник сетевого напряжения. Анализ сигнала разности показывает, что в нем присутствует основная гармоника, амплитуда которой составляет 0,02% от номинального значения, амплитуда 5-й гармоники составляет 0,015%, что соответствует ее подавлению фильтром 6-го порядка более чем в 1000 раз. Амплитуды более высоких гармоник в сигнале не фиксируются.

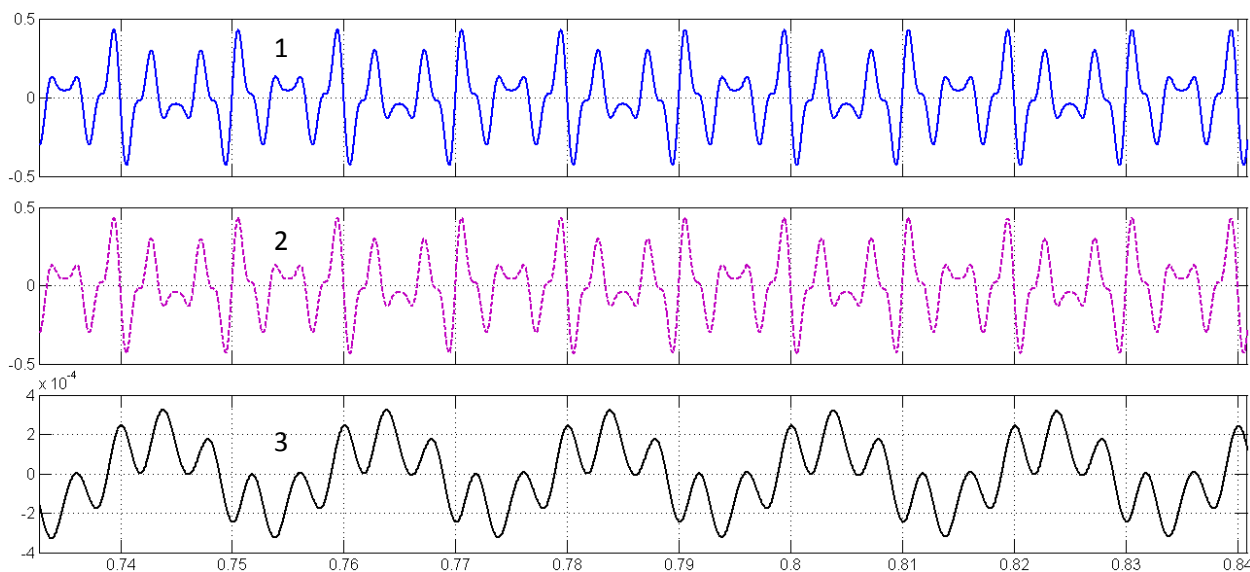


Рис. 7. Результаты моделирования при оценке точности выделения сигнала U_{Σ}

Как показало моделирование, разработанное устройство управления на базе полосового фильтра позволяет получить достаточно высокую точность выделения сигнала суммы высших гармоник сетевого напряжения, а применение канала компенсации фазового сдвига обеспечивает работу устройства при отклонении частоты от номинального значения как в статических, так и в динамических режимах.

Использование предложенного устройства в вольтодобавочных компенсаторах нелинейных искажений позволит эффективно решать задачу повышения качества электроэнергии в сетях автономных электростанций, в том числе и судовых.

Библиографический список

1. **Коробко, Г.И.** Влияние высших гармоник на работу судового электрооборудования и способы их снижения / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев // Великие реки'2011: 13-й Международный научно-промышленный форум, труды конгресса. – Н. Новгород, ННГАСУ.
2. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Л.: Судостроение, 1983. – 232 с.
3. **Коробко, Г.И.** Источник эталонного синусоидального напряжения, синхронизированного с сетью / Г.И. Коробко, С.В. Попов, В.В. Лебедев // Великие реки 2010: 12-й Международный научно-промышленный форум, труды конгресса. – Н. Новгород, ННГАСУ. 2011. Т. 2.

4. Лебедев, В.В. Анализ устройств выделения высших гармоник напряжения автономной электроэнергетической системы // Великие реки: труды 15-го международного научно-промышленного форума. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. Т. 2. – 382 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2014*

G.I. Korobko, V.V. Lebedev, S.V. Popov

**ISOLATION OF NONLINEAR DISTORTION SIGNAL WHEN THE FREQUENCY
AND THE AMPLITUDE OF SUPPLY VOLTAGE CHANGING.**

Volga state academy of water transport

Purpose: Designing and analysis of the isolation device of nonlinear voltage distortion signal in the autonomous electric power stations.

Design/methodology/approach: Analytical computation and simulation in Matlab Simulink.

Findings: The parameters of the compensation signal of the filter output voltage phase deviation are determined for a frequency changing of the supply voltage. The structural scheme and the model of the nonlinear distortion signal isolation device were developed.

Originality/value: The suggested device provides a precision isolation of the nonlinear distortion signal in case of static and dynamic operation of the autonomous electric power station. The developed model can be used in simulation of the nonlinear voltage distortion compensation devices.

Key words: autonomous electric power station, nonlinear voltage distortion, electric power quality, voltage frequency changing, voltage amplitude changing.