

УДК 621.313.632.629.12

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

А.К. Пронина<sup>1</sup>, асп., К.П. Путилин<sup>2</sup>, к.т.н., доц., Н.А. Петерсон<sup>2</sup>, ст. препод.

<sup>1</sup>Севастопольский национальный технический университет

<sup>2</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

На основе анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов в автономных электроэнергетических системах, содержащих мощные нелинейные потребители, исследуются вопросы качества электроэнергии в системе по показателю несинусоидальности напряжения для режимов резкопеременной нагрузки на автономные генераторы системы.

### Введение

Автономные электроэнергетические системы могут иметь в своем составе достаточно мощные нелинейные потребители (силовые статические преобразователи с подключенной нагрузкой), работа которых существенно ухудшает качество электроэнергии, искажая синусоидальную форму напряжения в сети. Для восстановления синусоидальной формы напряжения на общих шинах в силовой электроэнергетике применяют фильтры высших гармоник [2]. Простейшими фильтрами гармоник являются цепи из последовательно соединенных индуктивности и емкости, настроенные в резонанс на частоте подавляемой высшей гармоники. Использование пассивных фильтров позволяет одновременно решать также и проблему дефицита реактивной мощности, создаваемого в сети нелинейными потребителями [1, 2], в связи с чем L - C установки получили название фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

Однако эффективность ФКУ как фильтров высших гармоник может снижаться в случае отклонения частоты сети от номинального значения. Так как частоты высших гармоник пропорциональны частоте сети, то происходит расстройка режима резонанса одновременно всех фильтров, что приводит к снижению коэффициента фильтрации. Однако даже кратковременное расстройство в работе фильтров может привести к сбою в работе чувствительной электронной техники, подключенной к сети.

### Цели и задачи исследования

Целью работы является оценка эффективности ФКУ в переходных режимах АЭС (например, при пуске соизмеримого по мощности АД).

В соответствии с целью решаются следующие задачи:

- анализ процесса образования высших гармоник напряжения на шинах автономной электроэнергетической системы;
- характеристика способов подавления высших гармоник в целях улучшения качества электроэнергии;

- оценка эффективности использования пассивных фильтров в установившихся и переходных режимах системы;
- обоснование возможного пути улучшения качества электроэнергии в переходных режимах применением инерционных накопителей энергии.

### Моделирование процесса образования высших гармоник напряжения

В качестве объекта исследования принимается схема автономной электроэнергетической системы, изображенной на рис. 1.

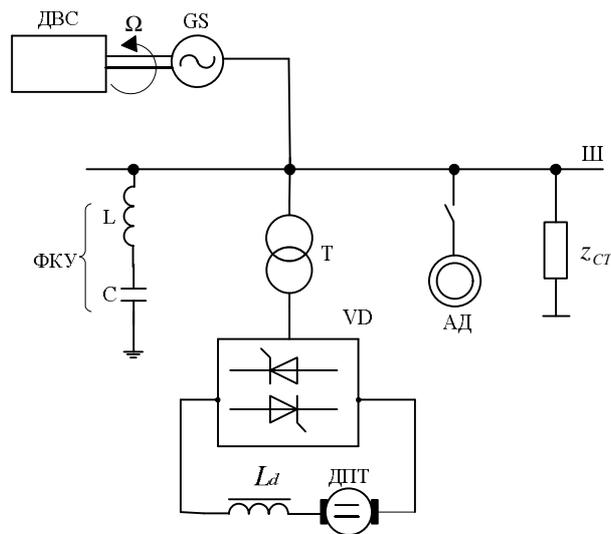


Рис. 1. Автономная электроэнергетическая система

Автономная электроэнергетическая система (АЭЭС) включает:

- синхронный генератор GS с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) или дизеля;
- нелинейный потребитель: трансформатор Т, управляемый выпрямитель VD, нагрузка - двигатель постоянного тока ДПТ, подключаемый через сглаживающий дроссель;
- вращающаяся нагрузка – асинхронный двигатель АД, и статическая нагрузка  $z_{ст}$ ;
- последовательный L – С фильтр или фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ).

Элементы системы подключены к общим шинам Ш, на которых работает генератор GS.

Подключенная к сети нелинейная нагрузка генерирует в сеть высшие гармоники тока. Замыкаясь через источник (генератор), токи высших гармоник вызывают падение напряжения на сопротивлении источника. Падение напряжения, налагаясь на синусоидальную ЭДС источника, создает опасные искажения синусоидальности напряжения на шинах потребителя.

Образование высших гармоник тока можно проанализировать на схеме замещения трехфазного мостового выпрямителя (рис. 2), где внутреннее сопротивление источника ЭДС –  $x_s$ , сопротивление входного трансформатора –  $x_t$ . Анодную группу выпрямителя составляют вентили 1, 3, 5, катодную группу – 2, 4, 6. В качестве вентилях (ключевых элементов) могут быть использованы диоды, тиристоры или IGBT-транзисторы.



Относительные значения  $I_v / I_1$  высших гармоник переменного тока при используемых допущениях оказываются не зависящими от угла управления  $\alpha$ . Основная гармоника тока  $I_1$  будет сдвинута относительно фазной ЭДС системы переменного тока точно на угол  $(\alpha + \gamma/2)$ . При этом преобразователем, наряду с активной мощностью, потребляется из сети также и реактивная мощность:

$$Q_{VD} = \sqrt{3}U_{2л} \cdot I_1 \cdot \sin\left(a + \frac{g}{2}\right).$$

Учтем далее, что реактивное сопротивление питающей системы для тока  $I_v$  пропорционально порядку гармоники  $x_{sv} = x_s \cdot v$ , где  $x_s$  - сопротивление при частоте  $f = 50$  Гц. Тогда напряжение высшей гармоники на шинах  $U_v = I_v \cdot x_{sv}$ .

Для приближенных расчетов обычно пренебрегают углом коммутации [2, 4], полагая  $\gamma = 0$ . Для такой кривой тока, имеющей прямоугольно-ступенчатую форму, амплитуды гармоник будут несколько завышенными и определяются соотношением

$$\frac{I_v}{I_1} = \frac{1}{v}. \quad (1)$$

В качестве сопротивления источника  $x_s$  в данном случае будет переходное сопротивление генератора

$$x'_d = x'_{d*} \cdot \frac{U_{нг}^2}{S_{нг}}, \quad (2)$$

где  $x'_{d*}$  - переходное сопротивление в относительных единицах ( $x'_{d*} \approx 0,2 \dots 0,3$ );

$U_{нг}$  - номинальное напряжение генератора, приведенное ко вторичному напряжению трансформатора,

$S_{нг}$  - полная мощность генератора.

Для гармоники напряжения на выводах генератора можем записать

$$U_v = \left( x'_{d*} \cdot \frac{U_{нг}^2}{S_{нг}} \cdot v \right) \cdot I_v,$$

Выразим далее ток  $I_1$  через мощность преобразователя  $S_{VD}$ :

$$I_1 = \frac{S_{VD}}{\sqrt{3} \cdot U_2}.$$

Так как  $U_{нг} \approx U_2$ , то относительная величина гармоники напряжения

$$\frac{U_v}{U_{III}} \approx \frac{S_{VD}}{S_{нг}} \cdot x'_d \quad \text{или} \quad \frac{U_v}{U_{III}} \approx \frac{S_{VD}}{S_k}, \quad (3)$$

где  $S_k$  - мощность КЗ питающей сети (в данном случае  $S_k = S_{нг}/x'_d$ ).

Для автономных систем, имеющих ограниченную мощность генераторов, выражение (3) по сути определяет главную проблему качества электроэнергии: чем больше относительная мощность нелинейной нагрузки, тем больше искажение синусоидальности напряжения на общих шинах.

Для исследования процессов в автономной системе с нелинейными нагрузками в лаборатории электромеханики СНУЯЭиП создана экспериментальная установка, функциональная схема которой показана на рис. 4. Схема включает синхронный генератор СГ, приводимый в действие двигателем постоянного тока ДПТ, и нагрузку в виде трехфазного мостового выпрямителя VD.

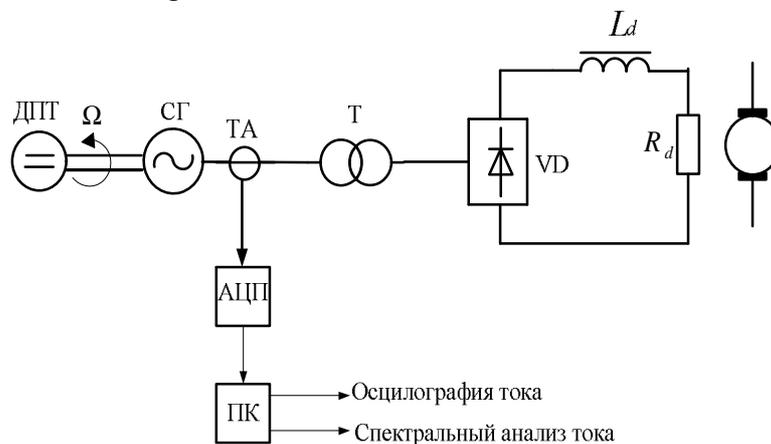


Рис. 4. Схема физической модели АЭЭС

Сигнал с датчика тока ТА поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП и выводится на персональный компьютер ПК, работающий в режиме осциллографа. Одновременно сигнал тока подвергается спектральному анализу. Полученная экспериментально осциллограмма мгновенного тока и его спектрограмма приведены на рис. 5.

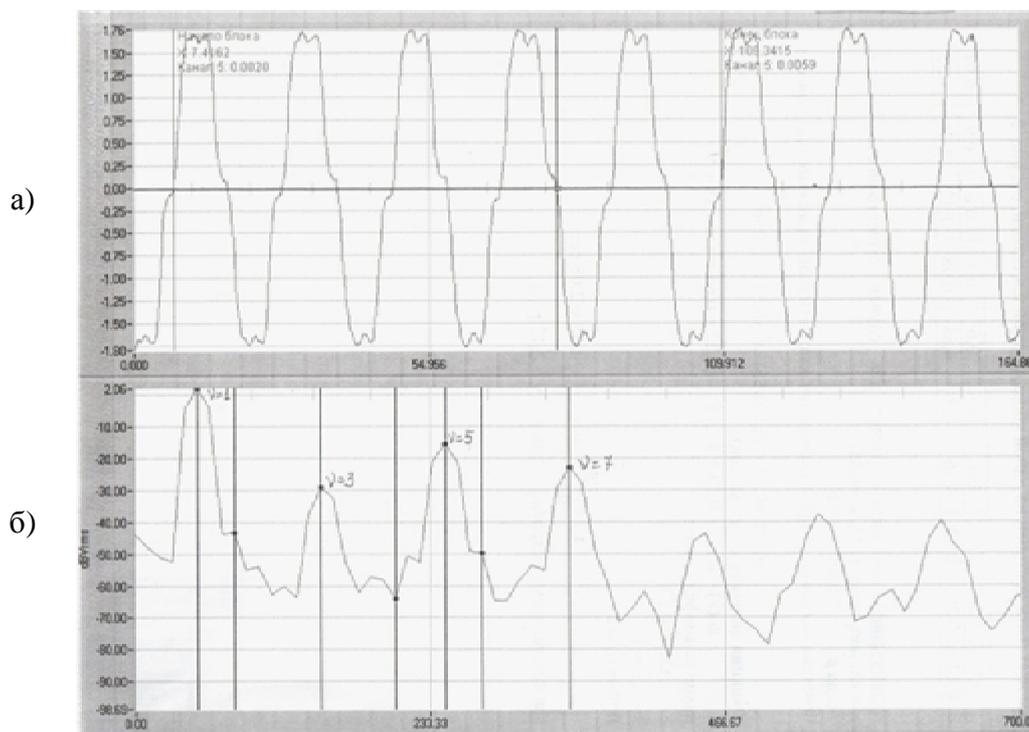


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса тока: а - осциллограмма тока; б - спектрограмма токовых гармоник

Спектр тока представлен в логарифмическом масштабе (по децибельной шкале). За пороговое значение принят уровень первой гармоники тока  $I_1$ . Уровни гармоник тока по децибельной шкале оцениваются как

$$L_{iv} = 20 \log \left( \frac{I_v}{I_1} \right).$$

Так, по уровню пятая гармоника меньше первой на 16 дБ, а седьмая - на 23 дБ, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

### Характеристика способов подавления высших гармоник

Для источника питания, имеющего мощность  $S_k \rightarrow \infty$  его внутреннее сопротивление стремится к нулю:

$$x_s = \frac{U_2^2}{S_k} \rightarrow 0.$$

При этом гармоники тока не могут образовать на сопротивлении сети сколь угодно значительных падений напряжения, и следовательно, искажения напряжения не будут наблюдаться.

В автономных электрических системах с конечным значением  $S_k$ , высшие гармоники напряжения, напротив, могут принимать недопустимо большие уровни. Для их подавления применяют различные способы [2, 4]. Наиболее распространенным способом подавления высших гармоник напряжения является фильтрация соответствующих гармоник тока. Работа пассивного L - C фильтра демонстрируется схемой на рис. 6.

Цепь пассивного  $L_v - C_v$  фильтра (ПФ) при настройке в резонанс на частоте гармоники  $\omega_v = v \cdot \omega_1$  практически шунтирует ветвь источника ЭДС сети с сопротивлением  $x_{sv} = x_s \cdot v$ . При высокой добротности RLC-контуров  $Q = 30 \dots 50$  применение многозвенного фильтра для подавления 5, 7 и 11 гармоник позволяет обеспечить в ветви источника  $x_s$  протекание практически синусоидального тока  $I_1$  [4].

В настоящее время проводятся исследования по разработке и применению активных фильтров высших гармоник (АФ). В отличие от пассивных фильтров, которые фактически замыкают токи гармоник на землю, активные фильтры генерируют в противофазе напряжения и токи на частотах высших гармоник, тем самым уничтожают искажения тока потребления нелинейных нагрузок.

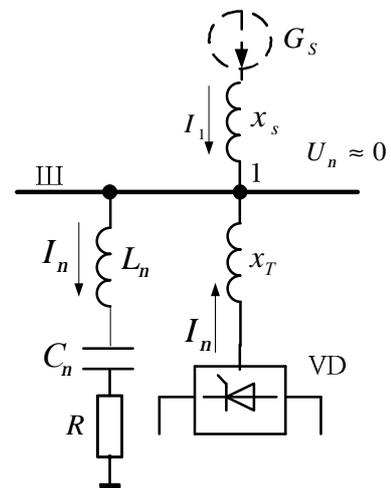


Рис. 6. Схема системы с фильтром высших гармоник

### Оценка эффективности фильтров при отклонениях частоты

Использование пассивных фильтров позволяет решить проблему качества электроэнергии в автономных системах при работе их в установившемся и квазистационарном режиме. Однако, если в электрических системах преобладают переходные

режимы, связанные с резкопеременной нагрузкой на генераторы, эффективность фильтров резко падает. К таким системам относятся судовые электроэнергетические установки, имеющие относительно большую суммарную мощность нелинейных потребителей и режимы с переменной нагрузкой: суда ледового плавания, лихтеровозы, буровые суда и стационарные буровые платформы, плавкраны большой грузоподъемности, суда-перегрузатели и т.п. [3]. Особенностью таких АЭЭС являются значительные колебания активной нагрузки, связанные с выполнением грузовых операций или частыми пусками мощных электроприводов (например, подруливающих устройств) и т.п.

Внезапный наброс нагрузки  $\omega$  на генератор вызывает появление на валу тормозного электромагнитного момента:  $\Delta M_{эм} = \Delta P / \omega$ , где  $\Delta P$  – величина приращения активной мощности;  $\omega$  – скорость вращения:  $\omega \equiv f_1$ .

При отклонениях частоты в системе пропорционально изменяются частоты высших гармоник, что приводит к одновременному расстройству режима резонанса всех фильтров. А это, в свою очередь, влечет за собой снижение коэффициента фильтрации гармоник. Коэффициент фильтрации принято оценивать отношением тока  $v$ -й гармоники к току той же гармоники при отключенном фильтре :

$$k_v = \sqrt{\frac{1 + \Delta f_*^2 \cdot Q^2}{1 + (\Delta f_*^2 \cdot Q + v^2 \varepsilon_v \cdot Q)^2}} < 1, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_v$  – относительное значение установленной мощности конденсаторов фильтра к мощности короткого замыкания питающей системы;  
 $Q$  – эквивалентная добротность фильтра на резонансной частоте;  
 $\Delta f_* = (f_1 - f_{1н}) / f_{1н}$  – относительное отклонение частоты сети.

Рассматриваемые обычно для промышленных сетей отклонения частоты невелики и составляют максимум 2...3 % (снижение частоты в энергосистемах в пике нагрузки). Что касается автономных систем, то эти отклонения могут достигать  $\pm 10$  %.

Такие отклонения или колебания частоты в сети резко ухудшают работу пассивных и активных фильтров высших гармоник.

На рис. 7 приведена тахограмма процессов системы автоматического регулирования двигателя (дизеля) при сбросах и набросах нагрузки. Возникающие в переходном процессе забросы скорости  $\Delta\omega$ , определяются быстродействием автоматики регулирования, а также механической инерцией движущихся частей дизеля и генератора.

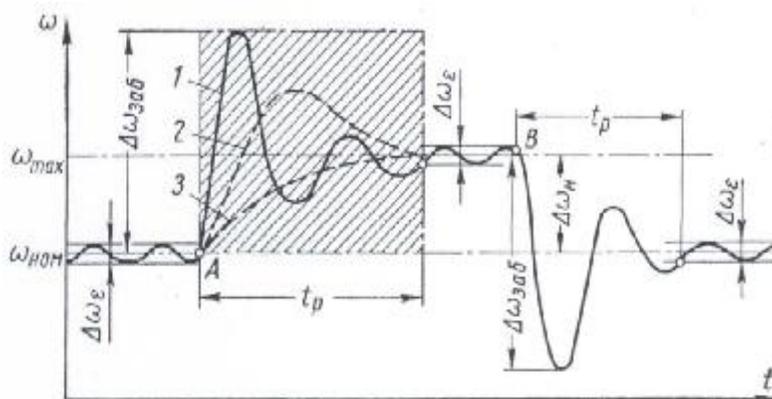


Рис. 7. Тахограмма переходных процессов системы автоматического регулирования двигателя при сбросах и набросах нагрузки

На рис. 7 следующие обозначения:  $\omega_{\max}$  – угловая скорость на холостом ходу предельной регуляторной характеристики;  $\omega_{\text{ном}}$  – угловая скорость номинального режима; 1 – колебательный переходный процесс; 2 – аperiodический переходный процесс с забросом; 3 – аperiodический переходный процесс без заброса.

При полном сбросе и набросе нагрузки, в зависимости от динамических свойств самого двигателя, заброс угловой скорости и отклонения частоты колеблются от 5 до 2 % при регуляторе первого класса, и от 24 до 8 % при регуляторе четвертого класса. Возможным решением задачи может быть применение дополнительных вращающихся инерционных масс в виде маховика, навешенного на вал агрегата.

Действительно, предположим, что время  $\Delta t_p$ , необходимое для восстановления баланса мощности на валу, задано и не может быть уменьшено. Под действием скачкообразного изменения мощности нагрузки на величину  $\Delta P$  отклонение скорости  $\Delta \omega$  будет определяться как

$$\Delta \omega = \frac{\Delta P}{\omega(J_d + J_m)} \cdot \Delta t_p,$$

где  $\Delta t_p$  – время регулирования, с;

$\omega$  – установившаяся скорость, 1/с;

$(J_d + J_m)$  – моменты инерции соответственно дизеля и маховика, кг·м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – изменения мощности, Вт.

Предлагаемый способ решения проблемы требует серьезных теоретических разработок и технико-экономического обоснования для конкретного случая с учетом структуры и режима работы всей электроэнергетической системы.

### Выводы

Анализ вопросов качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах с мощными нелинейными преобразователями и резкопеременной нагрузки позволяет сделать следующие выводы:

1. Существующие способы подавления высших гармонических с помощью пассивных и активных фильтров не обеспечивают требуемого качества электроэнергии в переходных режимах работы автономных систем.

2. Основная причина низкой эффективности фильтров высших гармоник – отклонения и колебания частоты сети, возникающие при внезапных набросах и сбросах активной нагрузки на автономные генераторы системы.

3. В качестве возможного пути кардинального решения проблемы предлагается исследование вопроса применения навешенного на вал генератора инерционного накопителя энергии маховикового типа. Оценка эффективности данного пути предполагает теоретические и экспериментальные исследования, и технико-экономическое обоснование.

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Г.К. Проніна, К.П. Путілін, М.О. Петерсон

На основі аналізу електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів в автономних електроенергетичних системах, що містять потужні нелінійні споживачі, досліджуються питання якості електроенергії в системі за показником несинусоїдальності напруги для режимів різкозмінного навантаження на автономні генератори системи.

## POWER QUALITY in STAND-ALONE ELECTRIC-POWER SYSTEMS in TRANSITIONAL MODES

A. Pronina, K. Putilin, N. Peterson

The electricity quality questions in system were examined according to the voltage anharmonicity index for the modes of the disturbance load on the autonomous system generators on the basis of electromagnetic and electromechanical transients' analysis in the stand-alone electric-power systems contained the powerful non-linear consumers.

### Список использованных источников

1. Глинетрник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей / С.Р. Глинетрник. – Л.: Наука, 1968. – 308 с.
2. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко [и др.]. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
3. Запальский В.Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта / К.Н. Запальский // Энергетика и энерго-ресурсосбережение: Вісник КДПУ им. М. Остроградского. – К.: КДПУ, 2009. – Вип. 3 (56). – С. 187 - 190.
4. Куско А. Качество энергии в электрических сетях /А. Куско. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2008. – 336 с. (Электротехника и энергетика.)
5. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1968. – 545 с.

Надійшла до редакції 12.09.2013 р.

УДК 629.122:621.352.

## АКТУАЛЬНОСТЬ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В ТОПЛИВЕ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

О.П. Радченко<sup>1</sup>, к.т.н., доц., А.Н. Горбенко<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
В.В. Колодяжный<sup>3</sup>, к.т.н., доц., В.С. Хачиков<sup>2</sup>, асп.

<sup>1</sup>Севастопольский факультет Киевской государственной академии водного транспорта

<sup>2</sup>Керченский государственный морской технологический университет

<sup>3</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Проведен анализ действующих норм, регламентирующих содержание серы в топливах, используемых на морских судах. Рассмотрены проблемы, возникающие при эксплуатации судов относительно контроля содержания серы в топливе и продуктах сгорания, а также современные способы их решения. Приведен сжатый анализ основных существующих методов десульфурации. Предложены методы уменьшения содержания серы в топливе для внедрения в пределах судна.

### Введение

В связи с мировой экологической ситуацией имеет место постоянное ужесточение норм, предъявляемых к качеству судовых топлив. Содержание серы в судовых топливах нормируется для различных районов мирового океана. Расходы на топливо в