

УДК 621.713.13: 621.313

Сивокобыленко В.Ф. (докт.техн.наук, проф.), Никифоров А.П. (канд.техн.наук, доц.)

Государственное высшее учебное заведение  
«Донецкий национальный технический университет»  
[apnikiforov@yandex.ua](mailto:apnikiforov@yandex.ua)

Бурлака В.В. (канд.техн.наук, доц.), Поднебенная С.К. (канд.техн.наук, ст.преп.)

Государственное высшее учебное заведение  
«Приазовский государственный технический университет»  
[vburlaka@rambler.ru](mailto:vburlaka@rambler.ru) ; [podsvet@gmail.com](mailto:podsvet@gmail.com)

## ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ УЧАСТКОВ СЕТИ СМАРТ-ГРИД НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

*Рассмотрены пути повышения живучести сети смарт-грид при набросах мощных нелинейных нагрузок введением активных фильтров в каждом участке сети. Решаются задачи уменьшения влияния средне- и высокочастотных составляющих возмущающих воздействий, влияющих на устойчивость и качество работы участков сети. Показаны возможности повышения качества электроэнергии при совместной работе оборудования цепочки «Генерация–накопление–потребление», обеспечивая возможность покупки-продажи электроэнергии между участками сети. Показаны положительные эффекты поддержания работоспособности ответственных нагрузок в узлах сети за счет применения активных фильтров.*

**Ключевые слова** – сеть смарт-грид, комплекс электрооборудования, живучесть, устойчивость, диагностика под напряжением, мониторинг, переходные процессы, качество электроэнергии

**Анализ последних исследований и публикаций.** Развитие сетей смарт-грид (СМГР) [1, 2] разного класса напряжения (до 1 кВ, 6–35 кВ, более 100 кВ) подразумевает решение задач «живучести», устойчивости, резервирования, а также поддержания эффективности работы комплекса электротехнического оборудования при сохранении основных показателей работы сетей СМГР. Под комплексом электротехнического оборудования будем понимать совокупность связанного оборудования, предназначенного для решения общей задачи – обеспечение бесперебойности питания потребителей электроэнергией приемлемого качества при возможности покупки-продажи электроэнергии.

На рис. 1 показана схема сети СМГР, составленная из участков  $U$  электротехнического оборудования, которые соединяются посредством узлов в сеть СМГР [2]. Решение задач обеспечения работы такой сети решаются на информационном уровне, формируя интеллектуальные (смарт) качества электрической сети. Электротехническое оборудование участка  $U$  состоит в общем случае из накопителя  $B$ , генератора  $G$ , потребителя  $X$  и элемента «живучести»  $L$  участка  $U$  сети. Под «живучестью» будем понимать обеспечение бесперебойности питания потребителей  $X$  электроэнергией приемлемого качества при различных режимах эксплуатации, отказах оборудования, повреждениях изоляции и др.

Электротехническое оборудование  $B, G, X, L$  может иметь внутренние электронные блоки формирования вход-выходных параметров напряжения  $U$ , токов  $I$ , работающие на высоких (за нормируемые 2 кГц) частотах. Совместная работа оборудования  $B, G, X, L$  проявляется в участке  $U$  (рис. 1) и узле СМГР изменениями параметров сигналов напряжения  $U$ , токов  $I$ , мощностей активной  $P$  и реактивной  $Q$  в разных частотных диапазонах. Будем рассматривать диапазоны частотных составляющих относительно промышленной частоты  $\omega$  – инфра-низких НЧС или по огибающим; низких (НЧС) – промчастота  $\omega$ ; средних (СЧС) – гармоники сети; высоких (ВЧС) – высокие частоты в сети. Разделение движений сигналов  $U, I, P, Q$  на разные частотные диапазоны позволяет разделить общую задачу об устойчивости, живучести, качестве работы сети СМГР на части и решать ее эффективными алгоритмами.

Среди эффективных алгоритмов решения общей задачи можно выделить стабилизацию траектории движения сигналов  $U, I$  относительно среднего значения этих сигналов за счет отбора энергии из сети в некоторый собственный накопитель во времена превышения среднего значения сигнала и отдачи электроэнергии во время понижения сигнала ниже среднего значения. Таким образом, рассматриваемые задачи решаются в диапазоне инфра-НЧС за счет (рис. 1) накопителей  $B$  при их работе в линейном, а не в режиме «включено–отключено»; в диапазоне НЧС – за счет стабилизаторов  $U, I$  (а так же источников питания высокоответственных нагрузок  $X$ ); в диапазонах СЧС, ВЧС – за счет накопителей пассивных фильтров или активных фильтров (АФ) [3–5]. Физическая реализуемость накопителей и схем их управления в батареях  $B$ , стабилизаторах источников питания нагрузки  $X$ , АФ предопределяет решение рассматриваемой задачи для разных классов напряжения сетей СМГР (до 1кВ, 6–35 кВ, более 100 кВ).

Характерные особенности сетей СМГР (рис. 1), [2] (малая генерирующая мощность, большие внутренние сопротивления и др.) определяют возможные режимы работы таких сетей. Так, включение в работу мощных нелинейных нагрузок  $X$  (по отношению к генерирующей мощности  $G$ ) приводят к глубоким изменениям (до 1.7 крат) траекторий движения сигналов  $U, I, P, Q$ . Даже при использовании в качестве генераторов  $G$  относительно мощных источников традиционной электроэнергии траектории движения сигналов  $U, I, P, Q$  будут подчиняться влиянию нелинейных нагрузок  $X$  ввиду наличия переходных сопротивлений в оборудовании между  $G$  и  $X$  (например, в АТР). Это приводит к возможным нарушениям устойчивости работы оборудования участков  $У$ , нарушениям работы цепочки «Генерация–накопление–потребление» в задачах эффективной работы оборудования и коммерческой целесообразности перетоков мощностей  $P, Q$  между участками  $У$  и, как следствие, реализации способов повышения живучести и устойчивости.

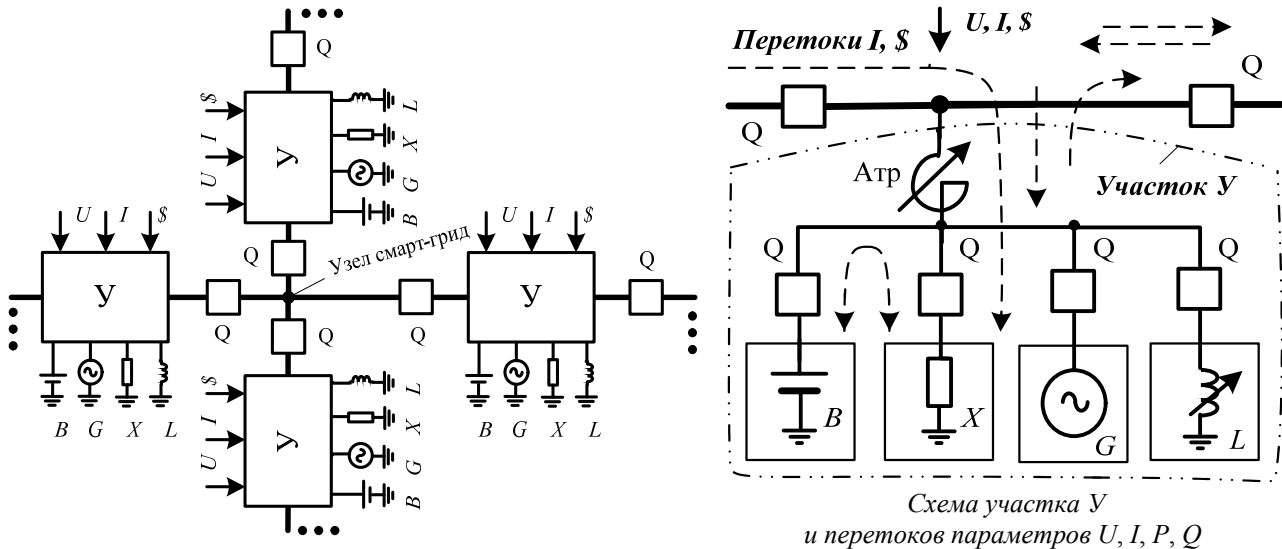


Рисунок 1 - Унифицированная структурно–функциональная схема сети смарт-грид

**Постановка проблемы.** Рассмотрим способы стабилизации траектории движения сигналов  $U, I, P, Q$  в диапазонах СЧС и ВЧС. Так одним из способов является применение пассивных  $T$ -,  $T$ -,  $\Pi$ -образных фильтров и демфирующих цепочек, подключенных на напряжения  $U_{\phi}, U_L$  нагрузки  $X$  (рис. 2). В применении пассивных фильтров (ПФ) накоплен большой опыт [3]. Однако способ имеет ряд недостатков (громоздкость и габариты элементов, необходимость выбора параметров ПФ для каждого типа нелинейных нагрузок  $X$ , возможное снижение эффективности фильтрации из-за разброса номиналов и параметров элементов, влияние изменений температуры на параметры элементов и др.). Другой способ. Для устранения фазовых сдвигов ( $\cos\varphi$ ) сигналов  $U, I$  промчастоты  $\omega$  между нагрузкой  $X$  и генератором  $G$  или батареи  $B$  применяют компенсаторы реактивной мощности. Дополнительно компенсаторы реактивной мощности повышают «живучесть» и устойчивость работы сети и экономическую эффективность перетоков электроэнергии между участками  $У$  сети (рис. 1). Недостатки такого способа исходят от применения пассивных элементов (в случае применения пассивных схем) и аналогичны недостаткам ПФ.

Общим недостатком ПФ является подпитка токами точки пробоя изоляции от собственного накопителя, что усугубляет аварийную ситуацию. АФ свободны от большинства недостатков ПФ. Это достигается за счет алгоритмов коммутации собственных накопителей электроэнергии силовыми ключами на высоких частотах (за нормируемые 2 кГц). Так при отклонении траектории сигнала напряжения от синусоиды промчастоты  $\omega$  накопители АФ либо отнимают, либо добавляют требуемую часть энергии, стабилизируя отклонения. Также алгоритмически может компенсироваться реактивная мощность. Дополнительно блокируется работа силовых ключей при повреждении изоляции сети, то сеть аварийная ситуация не усугубляется, а следовательно улучшается «живучесть» и устойчивость участков  $У$  сети СМГР.

Далее будем рассматривать восстановление траектории движения сигналов  $U, I, P, Q$  в СЧС- и ВЧС-диапазонах на основе применения АФ достаточной мощности.

**Устойчивость работы участков сети смарт-грид.** Под устойчивостью сети СМГР будем понимать возвращение смысловой ситуации «Нормальный режим работы» для технологических процессов потребителей за приемлемое время. Среди причин, приводящих к нарушению устойчивости можно выделить изменение величин параметров  $U, I$  в разных частотных диапазонах (степень влияния изменения  $U, I$  в разных частотных диапазонах различна), ресурсы энергии в элементах цепочки «Генерация–накопление–потребление», стоимость электроэнергии  $\$$  в участках  $У$  и др. Система (рис. 2) автоматической стабилизации нормального режима работы (АСНОР) сети СМГР по смыслу (на основе формирования и контроля смыслового сигнала  $S_{\text{СМАРТ}}(t)$ ) приведена в [2]. Также в [2] рассмотрены две модификации системы АСНОР - по смысловому сигналу  $S_{\text{ПРИБЫЛЬ}}(t)$  для экономической модели участка  $У$  сети СМГР и сигналу  $S_{\text{ДИСПЕТЧ}}(t)$  для диспетчерского

управления энергоресурсами оборудования цепочки «Генерация–накопление–потребление» в нормальном режиме работы сети. Смысловые сигналы  $S_{SMART}(t)$  могут использоваться (рис. 2) для построения автоматических систем управления многосвязанными объектами управления и защиты (МСОУЗ), а так же для оперативного контроля, регистрации, передачи сжатой информации через «горло» или узел в схеме сети СМГР (рис. 1). Степень сжатия информации в сигнале  $S(t)$  по сравнению с параметрическими сигналами  $U$ ,  $I$  и др. может достигать 1000 крат.

**Методы работы и формулирование целей статьи.** В этой работе рассмотрим построение модификации системы АСНОР на основе формирования и контроля смыслового сигнала «живучести»  $S_{ЖИВУЧ}(t)$ . Формирование сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  основано на построении унифицированной для рассматриваемых задач структуре смарт-детектора «За-Против» (рис. 2, 3) и применении структурно-информационного (SI) метода обработки информации [2, 6, 7]. Согласно SI-методу обработка информации выполняется морфологическим (МорфА), синтаксическим (СинтА), семантическим (СемА) автоматами распознавания (рис. 2, 3). Смысловый сигнал  $S_{SMART-Ж}(t)$  формируется СемА на основе баланса правил  $P$  распознавания «За-Против» увеличения  $S_{SMART-Ж}(t)$ . Каждое правило  $P$  имеет свой весовой коэффициент  $K$ , назначаемый методом экспертной оценки согласно вкладу правила  $P$  в общий результат, то есть формирование максимального значения  $S_{SMART-Ж}(t)$ .

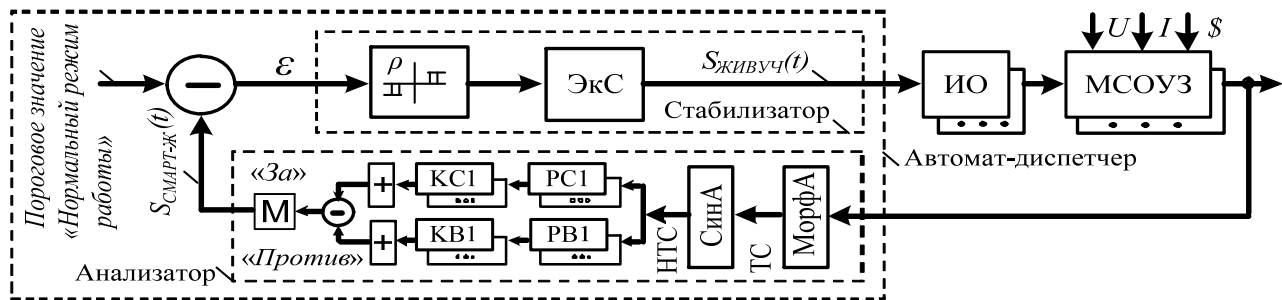


Рисунок 2 – Система стабилизации работы схемы смарт-грид по информационным составляющим

Изменения сигнала  $S_{SMART-Ж}(t)$  контролируется множеством порогов  $\rho$ . В общем случае порог  $\rho$  состоит из ряда порогов  $\rho$ , превышение которых ошибкой  $\varepsilon$ , следовательно, и сигналом  $S_{SMART-Ж}(t)$ , приводит к задействованию разных ИО. Одним из пороговых значений  $\rho$  является уставка системы АСНОР «Нормальный режим работы», которая отделяет несущественные изменения сигнала  $S_{SMART-Ж}(t)$ . Окончательные решения о формировании сигналов управления тем или иным исполнительным органом (ИО) принимаются автоматом экспертной системы (ЭКС), построенным так же на основе правил  $P$ . Переходные процессы в системе АСНОР (рис. 4) вызываются возмущающими воздействиями  $t$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $S$  и др. влияющие на состояния МСОУЗ.

Соответственно движения системы АСНОР также будем рассматривать в разных частотных диапазонах – инфра-НЧС (суточный цикл) десятки минут – часы; НЧС (по огибающим ПП) секунды – промчастота  $\omega=50$  Гц; СЧС – траектория движения промчастоты  $\omega-7$  гармоника  $\omega$ ; ВЧС – высокочастотные составляющие сети  $7\omega-40\omega$ , нормируются требованиями по качеству электроэнергии. На рис. 5 приведены сигналы «аварийных файлов» для инфра-НЧС диапазона движений в сети СМГР.

**Решение задачи об устойчивости и «живучести» сети СМГР.** Разделим общую задачу на ряд составляющих. Далее последовательно рассмотрим составляющие и их решения.

**Решение задачи «горла» в передаче информации.** Задачу об устойчивости и «живучести» сети смарт-грид можно решать на основе не только правильного построения МСОУЗ, но и на основе формирования управлений в системе АСНОР. Система АСНОР отличает множество промежуточных смысловых состояний МСОУЗ, кроме известных состояний самоконтроля «работает - не работает», а так же отличает ситуации в МСОУЗ близкие по внешним проявлениям, но отличающиеся по смыслу. Такая возможность, относящаяся к области технического интеллекта, может быть распространена на разные задачи, связанные с управлением МСОУЗ. Среди задач можно выделить управление в нормальном и аварийном режимах, частичная диагностика работы элементов сети СМГР под напряжением, а также задачи, связанные с «покупкой–продажей» электроэнергии, обменом информацией между участками сети СМГР. Так, например, сигналы управления разными ИО устраняют искажения траектории движения параметров  $U$ ,  $I$  за счет ресурсов энергии, находящихся в накопителях электроэнергии  $B$ ,  $L$ , а так же за счет дополнительных ресурсов генераторов  $G$ .

Свойство сжатия информации в смысловых сигналах  $S(t)$  системы АСНОР по сравнению с параметрическими сигналами (до 1000 крат) позволяет решать задачу «горла» (рис. 1), то есть передачи информации через узел сети СМГР. Согласно методам передачи информации, наработанным в радиотехнике, достаточно передавать смысловую информацию о сути ПП и состоянии МСОУЗ, а несущую частоту  $\omega$  (то есть сигналы значений параметров  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $Q$ ) можно не передавать, а при необходимости восстанавливать. Таким образом, можно ограничиться обменом информацией в сети СМГР смысловыми сигналами  $S(t)$ . Общим синхронизирующим временным интервалом  $T_c$  может являться суточный цикл и его дробные составляющие.

Дополнительно таким же способом можно решить задачи о распознавании и хранении аварийных файлов, накапливаемых регистраторами ПП в сети. Программы-распознаватели ПК рабочих мест служб сети,

работающие на основе смарт-детекторов «За-Против», формируют блинкеры, виджеты, текстовые сообщения о смысловом состоянии сети и оборудования [2, 6, 7], не привлекая дополнительного внимания оперативного персонала, но в случае необходимости, минимизируя время для разбора и локализации ситуаций.

**Уменьшение влияния возмущающих воздействий на МСОУЗ в сети СМГР на основе применения АФ.** Движения системы АСНОР и работа ИО в низкочастотных диапазонах порождают движения в более высокочастотных диапазонах. Это связано с резко-переменными включениями-отключениями  $B, G, X$  внутри участка  $U$  и изменениями параметров  $U, I$  в узлах сети СМГР (рис. 1). В случаях мощных нелинейных нагрузок  $X$ , множества нагрузок  $X$  без нормируемых свойств ШИМ-коррекции коэффициента мощности и нелинейности тока потребления (выпрямители, балласты, дуговые печи, сварочные и пусковые аппараты и др.) ток потребления  $I$  нагрузкой  $X$  имеет импульсный характер по отношению к синусоиде промчастоты  $\omega$  (рис. 5). Естественное наличие внутренних нелинейных сопротивлений оборудования  $Amp, B, G, X$ , линий передачи приводит к искажениям синусоиды промчастоты  $\omega$  в большей или меньшей мере. Искажения, приводящие к ограничениям амплитуды  $U$ , приводят к возникновению НЧС-движений в стабилизаторах напряжения  $Amp$  и в  $B, G$ , части высококачественных потребителей  $X$ . Искажения, приводящие только к появлению гармоник  $\omega$ , ухудшает работу электродвигателей и технологических процессов у потребителей  $X$ .

Ввиду того, что применение пассивных фильтров оказывается решением, влияющим на живучесть сети в целом, но громоздким и недостаточно эффективным, далее будем рассматривать стабилизацию движений траектории синусоиды  $\omega$  с помощью АФ в СЧС и ВЧС диапазонах (рис. 6). В каждом диапазоне частот СЧС, ВЧС схема АФ должна обладать соответствующей инерционностью ИО, схем управления и достаточными ресурсами промежуточных накопителей энергии в АФ. В работах [3-5] показано построение схем АФ для СЧС и ВЧС диапазонов (рис. 6).

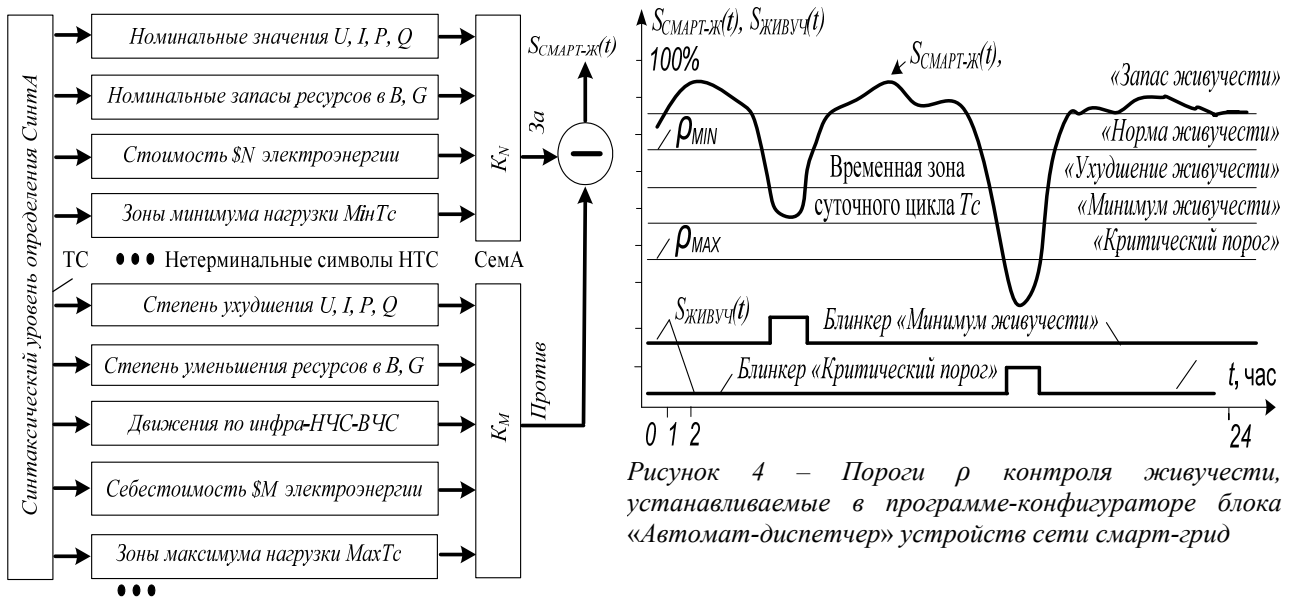


Рисунок 3 – Смарт-детектор участка  $U$

**Обеспечение «живучести» части высококачественных нагрузок сети СМГР при включении в работу мощных нелинейных нагрузок.** Известно, что суммарная мощность потребления всеми потребителями  $X$  должна соответствовать суммарной мощности источников энергии  $B, G$ . Не будем рассматривать случай «лавины частоты», для исключения которого возможно задействовать либо источники традиционной электроэнергии в качестве генераторов  $G$  в некоторых участках  $U$  (рис. 1), либо ограничивать потребителей  $X$  административно-техническими мероприятиями. Рассмотрим в качестве примера несколько смысловых ситуаций работы сети СМГР, которые могут быть устранены или сведены к минимальным проявлениям за счет перераспределения ресурсов запаса электроэнергии в элементах  $B, G$  внутри самого участка  $U$ , а также ближайших участков  $V$ . При включении (набросе) мощной (по сравнению с элементами  $B, G$ ) нагрузки  $X$  в одном из участков  $U$  в постоянном или импульсном режиме сигналы параметров сети  $U, I, P, Q$  изменяются во всех диапазонах частотных составляющих промчастоты  $\omega$ .

**Смысловая ситуация 1.** Мощность нагрузки  $X$  приводит к глубоким понижениям напряжения  $U$  (рис. 7) в узле сети СМГР (рис. 1). Высококачественные потребители  $X$  ближайших участков  $U$  переводятся на питание от накопителей  $B$ . Для отдаленных участков  $U$  такая смысловая ситуация может оказывать меньшее влияние и ситуация может быть сведена к минимуму за счет ресурсов  $G$  этих участков  $U$ . В такой ситуации ресурсы  $B$  полностью или частично не задействуются для локализации возмущений. Обеспечение мощного потребителя  $X$  электроэнергией осуществляется за счет ресурсов  $G$ , снижения качества электроэнергии. Работа АФ в такой смысловой ситуации будет приводить к сглаживанию переходов в значениях параметров  $U, I, P, Q$ , то есть инфра-НЧС, НЧС до и после включений нагрузки  $X$ , а также выравнивать траекторию движения синусоиды  $\omega$

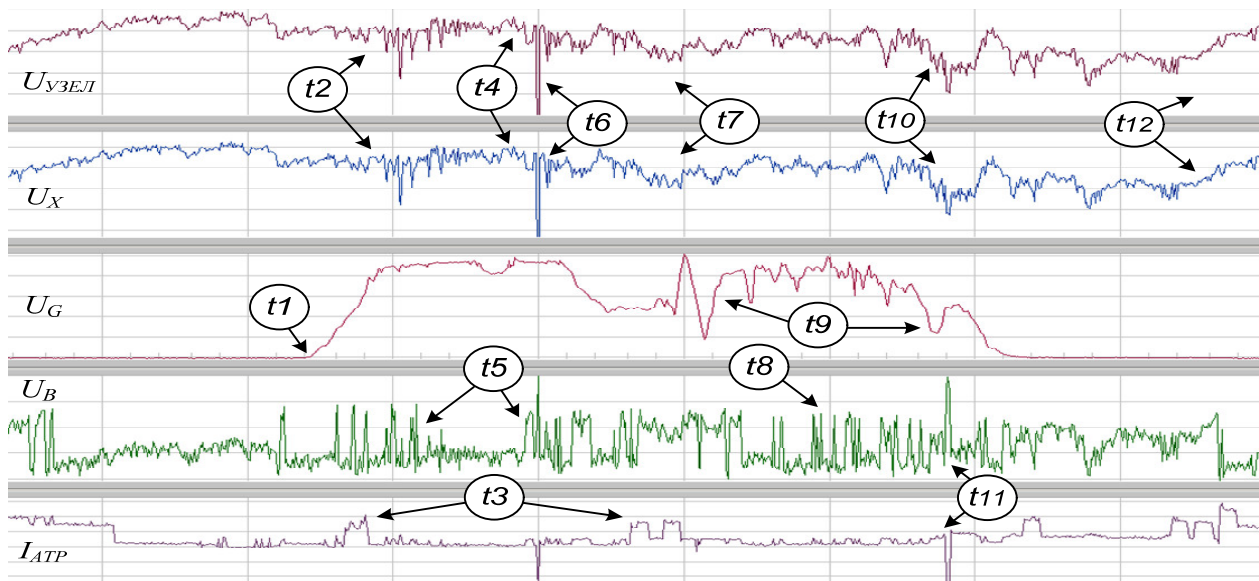
Рисунок 4 – Пороги  $\rho$  контроля живучести, устанавливаемые в программе-конфигураторе блока «Автомат-диспетчер» устройств сети смарт-грид

по СЧС. Эффективность работы АФ в такой смысловой ситуации зависит от быстродействия схемы управления АФ, ресурсов накопителей в АФ, мощности схмотехнических элементов АФ.

В случае, когда емкость накопителя  $B$  зависит от величины напряжения  $U$  (зависит от схемы управления зарядом накопителя  $B$ ) время работы высокоответственной части потребителей  $X$  от накопителя  $B$  может сокращаться в несколько раз. В случае максимума потребления суточного цикла  $MaxTc$  (рис. 5) и набросе мощной нелинейной нагрузки  $X$  работа, устойчивость и живучесть сети СМГР могут ухудшаться и приводить к отключению питания части высокоответственных потребителей  $X$ . Система АСНОР (рис. 2) формирует и контролирует смысловой сигнал  $S_{ЖИВУЧ}(t)$ . При понижении величины сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  ниже порога  $\rho$  система АСНОР разрешенными алгоритмами локализует возникшую смысловую ситуацию и минимизирует ее последствия посредством ИО.

Проявления нелинейных свойств нагрузки  $X$  зависят от моментов потребления тока  $I$  в течение периода промчастоты  $\omega$ , различны, могут проявляться в ограничении амплитуды синусоиды  $\omega$  по величине напряжения  $U$  (рис. 7). Такие искажения усугубляют работу схем управления и стабилизации источников питания части высокоответственных потребителей  $X$ , схем заряда и управления накопителями  $B$ , самой мощной нагрузки  $X$ . Проявления свойств нелинейной нагрузки  $X$  могут быть эффективно устранены АФ, повышая (в некоторых случаях обеспечивая) живучесть, устойчивость и возможность работы самой сети СМГР.

Например, ЭКС системы АСНОР (рис. 2) формирует блинкеры о степени ухудшения живучести в сети СМГР (рис. 4) «Порог живучести 1», «Порог живучести 2» и т. д. Смарт-детекторы «За-Против» (рис. 2), [2, 6, 7], построенные для системы АСНОР в [2], задействуют эти блинкеры в качестве терминальных символов ТС, т. е. аналогично рис. 3 с соответствующими весовыми коэффициентами  $K$ . Это приводит к изменению величин смысловых сигналов  $S_{ДИСПЕТЧ}(t)$ ,  $S_{ПРИБЫЛЬ}(t)$  и далее приводит (в зависимости от текущей смысловой ситуации, времени  $t$  суточного цикла  $Tc$ , настроенным значениям весовых коэффициентов  $K$ ) к частичному или полному блокированию расхода энергии накопителей  $B$  в этом участке  $V$ , соседних участках  $V$ , а так же реализуя пожелания в участках  $V$  о продаже электроэнергии  $\$$  за счет ресурсов генераторов  $G$  или отключаясь от участка  $V$  с чрезмерной перегрузкой, эквивалентной аварийной ситуации.



**Суточный ПП 060912.**  $t_1$  – начало генерации солнечной батареи  $G$ ,  $t_2$  – утренний максимум  $MaxTc$  потребляемой мощности  $P$ ,  $t_3$  – наброс нагрузки  $X$ ,  $t_4$  – обеденный минимум  $MinTc$ ,  $t_5$ ,  $t_8$  – интенсивный заряд-разряд накопителя  $B$ ,  $t_6$  – отключение электропитания узла  $U$  с питанием нагрузки  $X$  от накопителя  $B$ ,  $t_7$  – послеобеденный  $MaxTc$ ,  $t_9$  – дождь, пасмурно,  $t_{10}$  – вечерний  $MaxTc$ ,  $t_{11}$  – наброс нагрузки вне узла  $U$  с питанием нагрузки  $X$  от накопителя  $B$ ,  $t_{12}$  – ночной  $MinTc$

Рисунок 5 – Сигналы инфра-НЧС реальной физической модели сети СМГР

**Смысловая ситуация 2.** Мощность нагрузки  $X$  не приводит к чрезмерным понижениям величины напряжения  $U$  и задействованию ресурсов накопителей  $B$ , производительность нагрузки  $X$  соответствует технологическому процессу потребителей, диапазоны изменений параметров  $U, I, P, Q$  находятся в допустимых пределах работы стабилизаторов питания части высокоответственных потребителей  $X$  (рис. 7). При работе АФ устраняются НЧС, ВЧС, ограничивающие амплитуду синусоиды  $\omega$ , создавая запасы устойчивости, живучести, улучшаются условия для эффективности работы нелинейной нагрузки  $X$  и стабилизаторов питания части высокоответственных потребителей  $X$ . Также АФ устраняет ВЧС и компенсирует реактивную составляющую  $Q$ , то есть поддерживает качество электроэнергии для обеспечения возможности покупки-продажи электроэнергии в сети СМГР.

Требования к схеме управления АФ – умеренное быстродействие, соответствующее рабочим изменениям параметров  $U, I, P, Q$ , достаточные запасы энергии промежуточного накопителя в АФ. Для обеспечения

эффективности работы АФ в СЧС и ВЧС диапазонах  $\omega$ , уместно разделить схему АФ на СЧС и ВЧС части [3, 4], с соответствующими значениями инерционности и величинами энергии промежуточных накопителей в АФ.

Так, поскольку в СЧС диапазоне от АФ обычно требуется большая полная мощность, чем в ВЧС, вместо него имеет смысл применение статических компенсаторов (STATCOM), а в диапазоне ВЧС – полноценного АФ. STATCOM работает исключительно на основной частоте сети и занимается компенсацией реактивной мощности и несимметрии. При этом, из-за низкочастотности его инвертора, STATCOM может являться источником токов высших гармоник. АФ, имеющий меньшую полную мощность и повышенное быстродействие, занимается подавлением высших гармоник, не затрагивая первую гармонику частоты сети. Такой подход в ряде случаев позволяет снизить стоимость оборудования и повысить технико-экономические показатели СМГР.

Смысловой сигнал  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  системы АСНОР будет находиться в рабочих пороговых зонах  $\rho$  (рис. 4), не влияя на изменения смысловых сигналов  $S_{ДИСПЕТЧ}(t)$ ,  $S_{ПРИБЫЛЬ}(t)$  [2]. Текущее значение индикатора сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  будет иллюстрировать наличие и запас живучести сети СМГР (рис. 4). Индикатор сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  может быть конструктивно расположен на дисплее терминала РЗиА участка  $У$ , на дисплее АСУ ТП «Энерго» диспетчера сети СМГР, а так же включаться в аварийный файл для последующего контроля, разбора аварийных ситуаций и планирования технико-экономических мероприятий по повышению эффективности работы комплекса электротехнического оборудования сети СМГР.

*Смысловая ситуация 3.* Мощность нелинейной нагрузки  $X$  приводит только к появлению искажений движения траектории синусоиды промчастоты  $\omega$ . Искажения происходят по СЧС и ВЧС (гармоники  $\omega$ , ВЧС ПП и др.), которые АФ устраняет или сводит к минимуму в самостоятельном автоматическом режиме работы. Существенная роль АФ состоит не только в обеспечении экономической эффективности работы технологического оборудования (СЧС, ВЧС ухудшают характеристики работы электротехнического оборудования), но в возможности покупки-продажи электроэнергии между участками  $У$  сети СМГР. Известно, что для поддержания стандартных величин  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $Q$  необходимо задействовать дополнительный комплекс технических мероприятий и электрооборудования, что ведет к существенной разнице в себестоимости электроэнергии в участках  $У$  задействующих и не задействующих дополнительный комплекс. В этой связи вводятся и контролируются нормативными документами показатели качества электроэнергии, равные для всех участков  $У$ .

Система АСНОР формирует и контролирует смысловые сигналы  $S_{ПРИБЫЛЬ}(t)$ ,  $S_{ДИСПЕТЧ}(t)$ , которые участвуют в формировании команд «Покупка-Продажа» [2] для каждого участка  $У$  сети СМГР. Формирование и контроль сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  показывает запас живучести при изменении суточного цикла  $T_c$  (рис. 4). Контроль сигнала  $S_{ЖИВУЧ}(t)$  может выявить ситуации, когда из-за ухудшения показателей качества электроэнергии в одном или группе участков  $У$  другие участки  $У$  могут отказаться от продажи электроэнергии и в случае недостатка электроэнергии нарушится бесперебойность питания нагрузки  $X$ . Используя блинкеры «Живучесть №1» системы АСНОР можно минимизировать или устранить последствия таких ситуаций, например, повышая цену на продажу качественной электроэнергии или задействуя ресурсы участка  $У$  с источником  $G$  традиционной электроэнергии или другими разрешенными алгоритмами для ИО системы АСНОР или в ручном режиме диспетчером.

*Уменьшение влияния «наброса» нелинейных нагрузок на работу генераторов и накопителей электроэнергии в участках сети СМГР.* Уменьшение влияния «набросов» мощности нагрузок на параметры качества напряжения сети СМГР может быть также осуществлено с помощью средств активной фильтрации – АФ и STATCOM. Основное отличие задачи компенсации набросов мощности от задач подавления высших гармоник и компенсации несимметрии – в частотном диапазоне: набросы мощности имеют частоты порядка долей-единиц Гц. Это приводит к необходимости увеличения запаса энергии в накопителе звена постоянного тока АФ/STATCOM [8].

В результате применение обычных конденсаторов в звене постоянного тока оказывается экономически неоправданным, а в качестве накопителей могут использоваться механические (маховики) [9] или электрохимические (топливные элементы) [10]. Так, в [9] приведено описание проекта, в котором для компенсации набросов мощности использована машина двойного питания, ротор которой подключен к сети через циклоконвертер с диапазоном выходной частоты  $\pm 6,5$  Гц, а на валу установлен маховик с запасом энергии порядка 600 МДж.

*Обеспечение показателей качества электроэнергии при работе множества импульсных преобразователей электроэнергии, генераторов и накопителей.*

Очень часто нелинейные нагрузки сосредоточены в пределах одной организации или строения. Это, например, офисные комплексы с огромным количеством оргтехники, оснащенной импульсными источниками питания, гостиничные комплексы, бизнес-центры. В таких случаях решение проблемы генерации высших гармоник тока в питающую сеть может быть осуществлено двумя путями:

- 1) оснащение нелинейных нагрузок корректорами коэффициента мощности;
- 2) использование АФ для компенсации гармоник, генерируемой группой нелинейных нагрузок (рис. 6).

Первый путь очевиден и в условиях действующей организации/предприятия предполагает замену большого количества оборудования. По этой причине его целесообразно рассматривать на этапе проектирования электротехнических комплексов.

Второй путь предусматривает установку на фидере фильтра высших гармоник (пассивного или АФ), работа которого проиллюстрирована на рис. 7. Исследуемая нелинейная нагрузка представляет собой преобразователь частоты, работающий в условиях промышленного предприятия, при этом импеданс сети достаточно велик для того, чтобы несинусоидальность тока вызывала заметные искажения кривой напряжения.

При работе АФ на группу нагрузок ток, контролируемый АФ равен сумме токов всех нелинейных нагрузок, к которым подключен АФ. При этом токи гармоник присутствуют во внутренней сети организации/предприятия, на что сеть должна быть соответствующим образом рассчитана. Иногда оказывается экономически более целесообразным использовать один АФ на группу нелинейных нагрузок, чем проводить мероприятия по повышению коэффициента мощности этих нагрузок по отдельности. Основными определяющими факторами для принятия решения об установке АФ является соотношение мощности нагрузки (нагрузок) и мощности фильтра, уровень несинусоидальности потребляемого нагрузками тока и требуемый коэффициент мощности комплекса «нелинейная нагрузка (нагрузки) + АФ» [11].

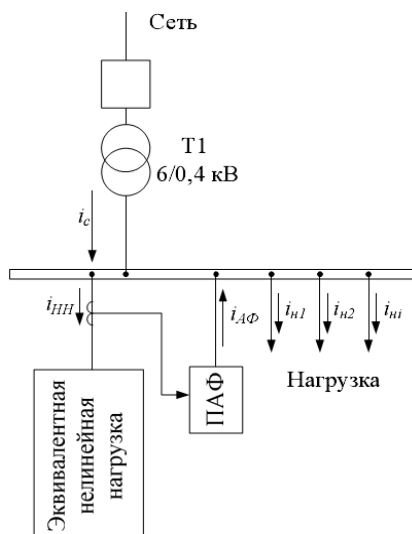


Рисунок 6 – Схема подключения параллельного АФ

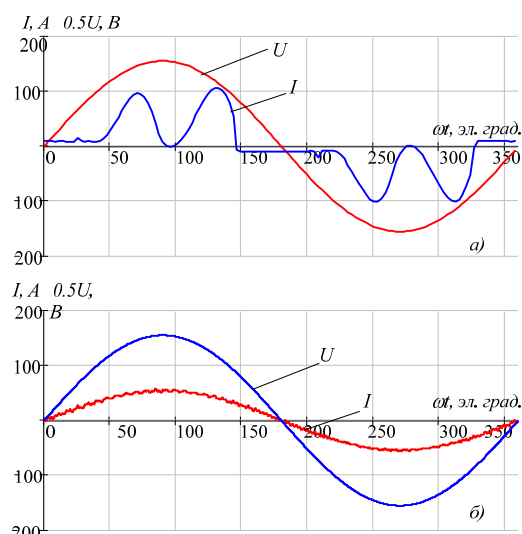


Рисунок 7 – Сигналы СЧС, ВЧС а) без работы АФ; б) при работе АФ

Известен еще один способ решения проблемы качества электроэнергии при работе множества нелинейных нагрузок: часть этих нагрузок оснащается корректорами коэффициента мощности с интегрированными функциями активного фильтра [12], [13]. Это позволяет снизить уровень высших гармоник потребляемого тока группы нелинейных нагрузок до уровня, предусмотренного стандартами (для России это ГОСТ Р 51317.3-2006) и/или снизить установленную мощность устройств фильтрации.

**Выводы.** 1. Рассмотрена совместная работа комплекса электрооборудования цепочки «Генерация–накопление–потребление» сети СМГР. Каждое оборудование формирует выходные параметры своей работы в разных частотных диапазонах и влияет на траекторию изменения напряжений и токов в участках и узлах сети СМГР. Поставлены задачи обеспечения «живучести» при поддержании качества электроэнергии в сети СМГР при различных возникающих факторах (работе мощных нелинейных нагрузок и др.).

2. Показана возможность стабилизации траектории движения сигналов напряжения, токов узлов и участков сети в разных частотных диапазонах за счет работы активных фильтров. Рассмотрены вопросы устойчивости совместной работы АФ с оборудованием цепочки «Генерация–накопление–потребление», а так же между собой.

3. Проведены описания алгоритмов работы АФ в разных частотных диапазонах сигналов напряжений и токов. Показаны осциллограммы, иллюстрирующие устранение влияния наброса мощных нелинейных нагрузок на источники питания для задач обеспечения работы части высококачественных нагрузок и обеспечения купли-продажи электроэнергии между участками сети СМГР.

4. Показано, что для определения экономической целесообразности использования АФ на группу нелинейных нагрузок, требуются дополнительные исследования и сравнение с экономической целесообразностью проведения мероприятий по повышению коэффициента мощности этих нагрузок по отдельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников В.И., Левшов А.В., Сивокобыленко В.Ф. Перспективы развития интеллектуальных энергосистем // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Вып. 28. - Харьков:, 2010.
2. Никифоров А.П. Диспетчер smart-грид в каждом устройстве потребителя. Технические и экономические задачи. Наукові праці Донецького національного технічного університету, № 1(12)-2(13) – Донецьк, 2012 р. - С 179-187.
3. Бурлака В.В. Современная схемотехника импульсных источников питания с активной коррекцией коэффициента мощности /Бурлака В.В., Гулаков С.В. // Мариуполь : ГВУЗ “ПГТУ”, 2013. – 123 с.
4. Поднебенная С.К. Двухступенчатый силовой параллельный активный фильтр / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та енергетика». – Донецьк: ДонНТУ. – 2013. – № 1(14). – С. 222 – 226.
5. Поднебенная С.К. Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания при помощи параллельного активного фильтра с повышенной эффективностью / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – № 3 (28). – С. 221 – 225.
6. Никифоров А. П. Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты // Научно-производственный журнал «Техническая электродинамика» и Материалы 10 научно-технической конференции «Проблемы современной электротехники 2010». Часть 2. НАН Украины. Институт электродинамики - Киев, 2010.- С. 73-76.
7. Никифоров А.П., Никифоров П.Р. Определение поврежденного участка объекта защиты и управления в условиях неопределенности // Материалы 17 международной конференции «Автоматика-2010». Харьковский Нац. университет радиоэлектроники. Харьков, 2010.- С.170-172.
8. Поднебенная С.К. Разработка методики выбора емкости конденсатора звена постоянного тока параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Университетская наука – 2013: Междунар. научно-техническая конференция, Мариуполь, 13-16 мая 2013. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – Т. 2. – С. 16.
9. Richard G. Hoft, SCR Applications Handbook. – International Rectifier, 1977.
10. M. Mohr, M. Bierhoff, F.W. Fuchs, Dimensioning of a Current Source Inverter for the Feed-in of Electrical Energy from Fuel Cells to the Mains, Paper 41, presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, NORPIE 2004, Trondheim, Norway, June 14-16, 2004.
11. Поднебенная С.К. К вопросу выбора мощности параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці». – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – С. 15 – 16.
12. Патент №100449 України на винахід. МПК Н02М 7/02 (2006.01) Спосіб керування активним коректором коефіцієнта потужності /В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет – № а 2011 05378; заявл. 27.04.2011; опубл. 25.12.2012. – Бюл. № 24. – 5 с.
13. Бурлака В.В. Метод управления корректором коэффициента мощности с интегрированными функциями активного фильтра / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.А. Федоровская // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 226-231.

Надійшла до редакції 07.04.2014

Рецензент: М.В. Гребченко



A.

Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»

A.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський  
національний технічний університет»

**Підвищення живучості комплексу електротехнічного обладнання ділянок мережі смарт-грід на основі застосування активних фільтрів.** Розглянуто шляхи підвищення живучості мережі смарт-грід при накидах потужних нелінійних навантажень введенням активних фільтрів в кожній ділянці мережі. Вирішуються задачі зменшення впливу середньо- і високочастотних складових збурюючих впливів, що впливають на стійкість і якість роботи ділянок мережі. Показано можливість підвищення якості електроенергії при спільній роботі обладнання ланцюжка «Генерація-накопичення-споживання», забезпечуючи можливість купівлі-продажу електроенергії між ділянками мережі. Вказані позитивні ефекти підтримки працездатності відповідальних навантажень у вузлах мережі за рахунок застосування активних фільтрів

**Ключові слова** - мережа смарт-грід, комплекс електротехнічного обладнання, живучість, стійкість, діагностика під напругою, моніторинг, перехідні процеси, якість електроенергії, технічний інтелект

A.

State Institution of Higher Education  
«Donetsk National Technical University»

A.

State Institution of Higher Education  
«Priazovsky State Technical University»

**Survivability set of electrical equipment for smart-grid based applications active filters.** Examined ways to improve the survivability smart-grid when connecting powerful non-linear loads the introduction of active filters in each section of the network. Solved the problem of reducing the influence of medium- and high-frequency components of the perturbation, which affect the stability and quality of work of network sites. The possibilities of increasing the quality of electricity during the joint operation of the equipment chain «Generation-accumulation-consumption», providing an opportunity of purchase and sale of electricity between the sections of the network. This is shown positive effects for maintaining the health of critical loads in the nodes of the network through the use of active filters.

**Key words** – network smart-grid, complex electrical equipment, survivability, sustainability, diagnostics voltage transients, monitoring, power quality, technical intellect