

ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РЕАКТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА

Розглянуті напрямки удосконалення призначеного для автономної електроенергетичної системи (ЕЕС) з напівпровідниковими перетворювачами (НП) керованого фільтрокомпенсуючого пристрою (КФКП), який містить резонансний LC-фільтр (РФ) і реакторний компенсатор (РК) з широтно-імпульсним регулюванням (ШИР). Встановлені умови узгодження частотних характеристик ЕЕС зі спектрами гармонік, генерованих у мережу живлення як НП, так і РК. Доведені можливість і доцільність використання запропонованої удосконаленої структури КФКП, в якій основний РФ є також перешкодозахисним по відношенню до РК з ШИР. Теоретичні висновки підтверджені модельним експериментом. Бібл. 5, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: керований фільтрокомпенсуючий пристрій, реакторний компенсатор з широтно-імпульсним регулюванням, коефіцієнт несинусоїдальності, модельний експеримент.

Рассмотрены направления усовершенствования предназначенного для автономной электроэнергетической системы (ЭЭС) с полупроводниковыми преобразователями (ПП) управляемого фильтрокомпенсирующего устройства (УФКУ), содержащего резонансный LC-фильтр (РФ) и реакторный компенсатор (РК) с широтно-импульсным регулированием (ШИР). Установлены условия согласования частотных характеристик ЭЭС со спектрами гармоник, генерируемых в питающую сеть как ПП, так и РК. Доказаны возможность и целесообразность применения предложенной усовершенствованной структуры УФКУ, в которой основной РФ является также помехозащитным по отношению к РК с ШИР. Теоретические выводы подтверждены модельным экспериментом. Библ. 5, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: управляемое фильтрокомпенсирующее устройство, реакторный компенсатор с широтно-импульсным регулированием, коэффициент несинусоидальности, модельный эксперимент.

Введение. Проблема обеспечения качества электроэнергии (КЭ) и электромагнитной совместимости (ЭМС) в автономных электроэнергетических системах (ЭЭС) современных морских судов и платформ является весьма актуальной в связи с применением на них мощных полупроводниковых преобразователей (ПП) в составе гребных электроустановок, подруливающих устройств, различных технологических электроприводов. Снижение КЭ в таких ЭЭС обусловлено двумя причинами: наличием высших гармоник в составе потребляемого тока и фазовым сдвигом основной гармоники этого тока относительно напряжения сети.

Разработка эффективных системных управляемых фильтрокомпенсирующих устройств (УФКУ) для автономных (судовых) ЭЭС с ПП связана с выполнением специфических, зачастую противоречивых требований: точность компенсации реактивной мощности в статике и динамике, высокое быстродействие, эффективное снижение высших гармоник в широком диапазоне частот для ограничения коэффициентов несинусоидальности напряжения сети K_{US} и потребляемого тока K_{IS} , минимальное количество настраиваемых цепей.

Задача осложняется тем, что современные активные или гибридные УФКУ сами являются источниками высших гармоник, ввиду наличия в их составе полупроводниковых ключей [1,2,3].

Цель работы. Обеспечение КЭ и условий ЭМС путем усовершенствования структуры и принципов управления УФКУ, использования быстродействующего реакторного компенсатора (РК), а также согласования частотных характеристик ЭЭС со спектрами гармоник, генерируемых, как ПП, так и РК.

Задачи исследования.

1. Разработка принципов построения усовершенствованных структур силовой части и обоснование способов управления быстродействующих УФКУ.

2. Анализ частотных характеристик эквивалентных сопротивлений ЭЭС и коэффициентов снижения гармоник тока, генерируемых ПП и РК, при различных вариантах УФКУ. Определение условий исключения резонансного повышения гармоник.

3. Проверка результатов анализа и практических рекомендаций посредством модельного эксперимента.

Обобщенная схема автономной ЭЭС с ПП и УФКУ показана на рис.1,а. Генератор (питающая сеть) представлен синусоидальной ЭДС e_s с амплитудой E_m и сопротивлением короткого замыкания X_S , трансформатор или входной реактор ПП – сопротивлением X_{II} . В состав УФКУ входит резонансный последовательный LC-фильтр (РФ), состоящий из сопротивлений X_{L0}, X_{C0} и реакторный компенсатор, условно показанный регулируемым эквивалентным сопротивлением на основной гармонике $X_{РКЭ}$. Порядок частоты настройки РФ соответствует нулю частотной характеристики системы и выбирается из условия $\nu_{РФ0} = \omega_{РФ0} / \omega = \sqrt{X_{C0} / X_{L0}} = p - 1$, где $\omega_{РФ0}$ – резонансная частота фильтра, ω – частота сети, p – пульсность ПП. Снижая высшие гармоники, РФ одновременно является генератором реактивной мощности на основной гармонике $Q_{РФ} = 3U_{\Phi}^2 / (X_{C0} - X_{P0})$, где U_{Φ} – действующее значение фазного напряжения сети ($U_{\Phi} \approx E_m / \sqrt{2}$).

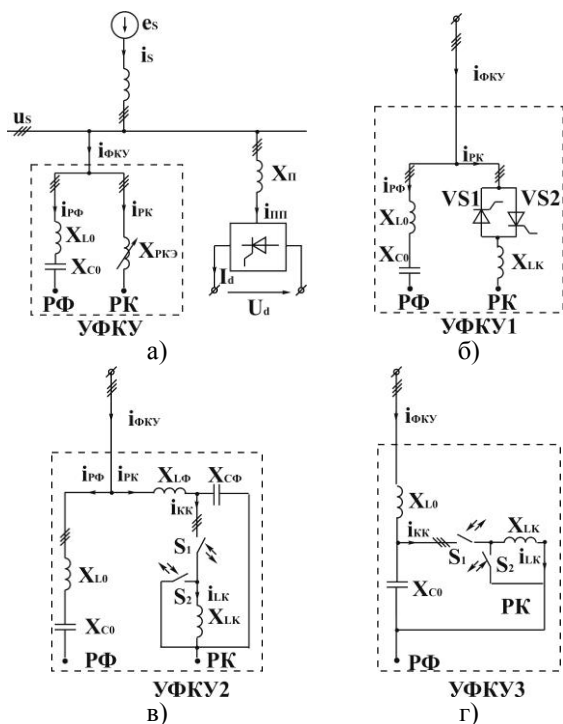


Рис. 1 Структура автономной ЭЭС с ПП и ФКУ:
а) обобщенная схема; б) ФКУ1 – с фазовым регулированием РК; в) ФКУ2 – с широтно-импульсным регулированием РК и собственным помехозащитным фильтром; г) ФКУ3 – с широтно-импульсным регулированием РК и использованием РФ как помехозащитного

РК потребляет реактивную мощность $Q_{PK} = 3U_{\phi}^2 / X_{PK\Delta}$. Широкое использование получила схема РК с фазовым регулированием на основе встречно-параллельно включенных однопереходных тиристоров (УФКУ1 на рис.1,б) [4]. Основными недостатками этой схемы являются генерация низкочастотных гармоник в питающую сеть, а также существенное время задержки регулирования, составляющее половину периода сети $T/2 = \pi/\omega$.

Указанных недостатков лишен быстродействующий реакторный компенсатор с широтно-импульсным регулированием (ШИР) на высокой частоте (рис 1,в,г).

Основные структуры трехфазного реакторного компенсатора с полупроводниковым широтно-импульсным регулятором на основе ключей переменного тока показаны на рис.2,а,б. Благодаря свойству связности трехфазных цепей без нейтрального провода в этих схемах достигается упрощение по сравнению с прямым объединением однофазных регуляторов. Например, в схемах на рис.2,а,б использованы соответственно четыре и пять ключей вместо шести. Полупроводниковые ключи переменного тока, выполненные на базе транзисторов и диодов представлены на рис.2,в,г. Вместо транзисторов могут быть использованы двухпереходные тиристоры. Вариант ключа на

рис.2,в предпочтительнее, так как содержит меньшее количество управляемых элементов.

Ключи S1 и S2, периодически коммутируемые одновременно, подключают реактор X_{LK} к трехфазному напряжению в течение временного интервала t_1 . Ключи S3, S4, и S5 включаются только при отключении S1 и S2 и служат для закорачивания фаз реактора на время t_2 . Таким образом, период коммутации ШИР $T_K = t_1 + t_2$. Управление индуктивностью РК осуществляется за счет изменения относительного времени проводящего состояния ключей S1, S2 (скважности) $\gamma = (t_1 + t_2)/T_K$. При работе широтно-импульсного регулятора происходит периодическое чередование режимов подключения реактора на трехфазное напряжение и режимов его трехфазного к.з. Изменяемое эквивалентное сопротивление фазы РК $X_{PK\Delta} = X_{LK} / \gamma^2$.

В отличие от рис.2,а в схеме на рис.2,б вместо закорачивания фаз реактора тремя параллельными ключами применено междуфазное закорачивание двумя ключами S3 и S4.

В схеме на рис.2,б вместо двух ключей переменного тока S3 и S4 может быть использован короткозамыкатель с одним ключом постоянного тока, показанный на рис.2,д.

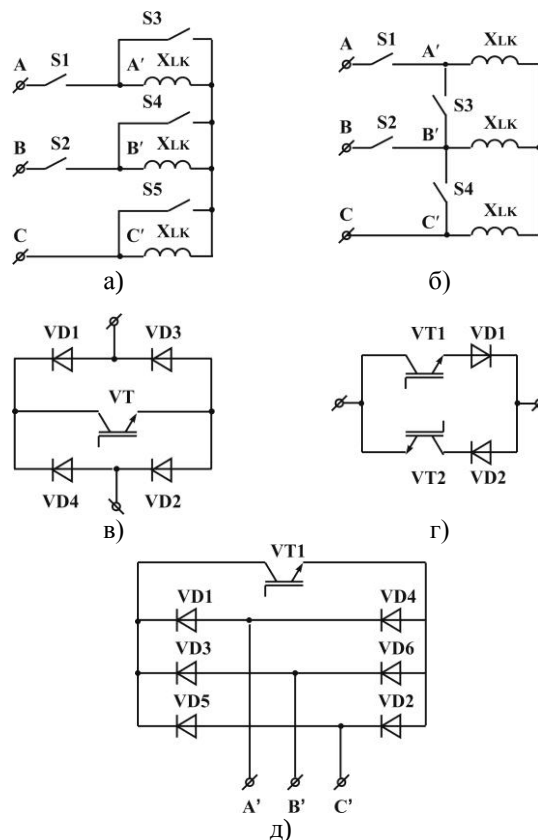


Рис. 2 Трехфазный РК с полупроводниковым ШИР: а,б – основные структуры РК, в,г – полупроводниковые ключи переменного тока, д – короткозамыкатель на одном полупроводниковом ключе постоянного тока

На рис.3 представлена модифицированная схема трехфазного РК с ШИР. Здесь последовательные ключи выполнены на встречно-параллельно включенных транзисторах и диодах. Формы токов и напряжений в фазах регуляторов, выполненных по схемам рис.2,а,б и рис.3 одинаковы и представлены на рис.4.

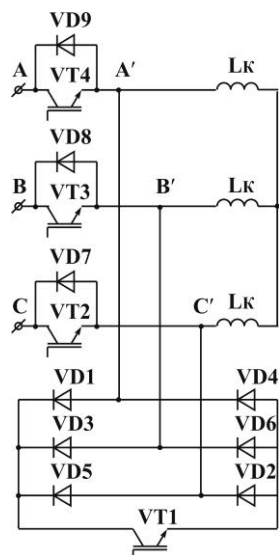


Рис. 3 Модифицированная схема трехфазного РК с ШИР

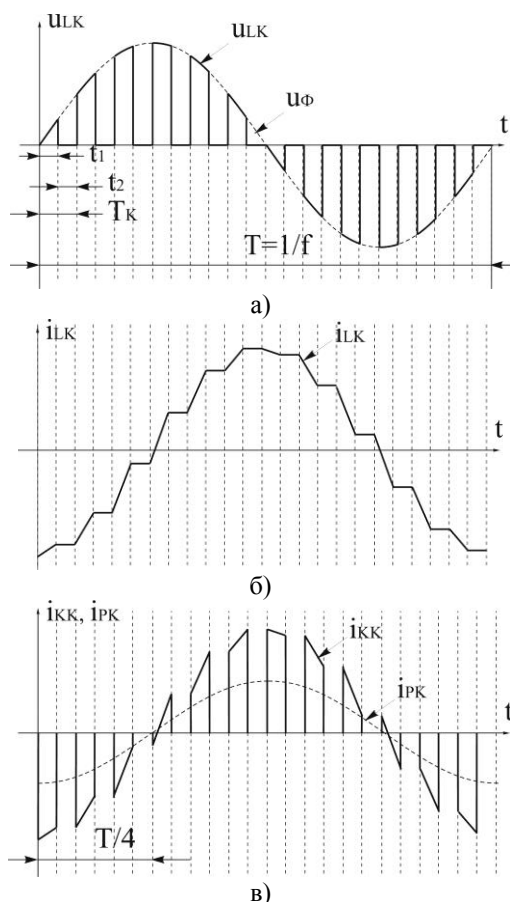


Рис. 4 Временные диаграммы фазных напряжений и токов РК с ШИР: а) напряжение на реакторе u_{LK} ; б) ток реактора i_{LK} ; в) ток ветви последовательного ключа i_{KK} и входной ток фазы РК i_{PK}

Чтобы фазные токи и напряжения системы с РК и ШИР не содержали постоянных составляющих, необходимо обеспечить частоту коммутации $f_k = 1/T_k = n_k \omega / 2\pi$, где $n_k = 6k$, $k = 1, 2, 3, \dots$. При этом условии в установившихся режимах кривые напряжений и токов будут периодическими, а их спектры имеют дискретный характер. Для современных силовых модулей на базе IGBT ключей частота коммутации может достигать 20 кГц.

Каждая ветвь РК с последовательным ключом по отношению к внешней цепи является источником импульсного квазисинусоидального тока i_{KK} . Высшие гармоники этого тока (помехи) имеют порядки $v = kn_k \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Действующие значения этих гармоник

$$I_{KK(v)} = \frac{2\sqrt{2}\gamma U_\phi \sin v\pi\gamma}{X_{LK} v\pi}. \quad (1)$$

Для защиты питающей сети от ВЧ помех, создаваемых ШИР, возможно включение на входе РК Г-образного помехозащитного фильтра низких частот (ФНЧ), образованного элементами $X_{L\phi}$, $X_{C\phi}$ (рис. 1, в). Рекомендуется выбирать $X_{L\phi} \ll X_{LK}$ (например $X_{L\phi} = 0,05 X_{LK}$). Величина $X_{C\phi}$ выбирается из условия обеспечения необходимого коэффициента фильтрации, показывающего во сколько раз амплитуда остаточной помехи в составе фазного тока компенсатора i_{PK} на частоте коммутации меньше исходной в составе тока i_{KK} .

Коэффициент фильтрации

$$K_\phi \approx (2\pi f_k)^2 / \omega_{\Pi\phi 0}^2, \quad (3)$$

где $\omega_{\Pi\phi 0} = \sqrt{1/(L_\phi C_\phi)}$ – собственная резонансная частота помехозащитного фильтра. Следовательно,

$$X_{C\phi} < n_k^2 X_{L\phi}. \quad (4)$$

Из (3) следует, что, например, при $K_\phi = 100$,

$$\omega_{\Pi\phi 0} \approx 0,1 \omega_k = 0,1(2\pi f_k).$$

При выборе достаточно высокой частоты коммутации ($f_k \approx 20$ кГц), в отличие от силового резонансного фильтра, входящего в состав ФКУ, помехозащитный фильтр РК является «легким» [4].

Благодаря наличию помехозащитного фильтра входной ток РК i_{PK} имеет практически синусоидальную форму. Его действующее значение

$$I_{PK} = I_{KK(1)} = \gamma^2 U_\phi / X_{LK}. \quad (5)$$

Реактивная мощность потребляемая РК

$$Q_{PK} = 3U_\phi I_{PK} = 3\gamma^2 U_\phi^2 / X_{LK}. \quad (6)$$

Параметры РФ выбираются, исходя из двух условий: ограничения несинусоидальности напряжения сети и компенсации реактивной мощности ПП. Условием полной компенсации реактивной мощности для любого режима системы ПП-УФКУ является соотношение

$$Q_{PF} - Q_{PK} - Q_{ПП} = 0. \quad (7)$$

Здесь и далее будем считать, что в качестве ПП рассматривается тиристорный преобразователь (ТП). Реактивная мощность, потребляемая ПП

$$Q_{ПП} \approx I_d \sqrt{U_{d0}^2 - U_d^2}, \quad (9)$$

где U_{d0} – максимальное выпрямленное напряжение соответствующее углу управления $\alpha = 0^\circ$; U_d, I_d – текущие значения выпрямленного напряжения и тока.

Если во всем диапазоне регулирования ПП выпрямленный ток равен номинальному ($I_d = I_{dH}$), то $Q_{ПП}$ принимает максимальное значение при минимальном значении $U_d = U_{dmin}$, соответствующем максимальному углу управления α_{max} .

$$Q_{ППmax} \approx I_{dH} \sqrt{U_{d0}^2 - U_{dmin}^2}. \quad (10)$$

В этом случае необходимые реактивные мощности РФ и РК определяются из соотношения

$$Q_{РФmax} = Q_{РКmax} = Q_{ППmax}. \quad (11)$$

При найденных из (11) параметрах УФКУ в соответствии с [5] необходимо определить значение коэффициента несинусоидальности напряжения системы K_{US} . Может оказаться, что условие (11), необходимое для компенсации реактивной мощности, будет недостаточным для ограничения K_{US} , т.е. для компенсации мощности искажения. В этом случае, на следующем этапе расчета в качестве исходных принимаются значения

$$Q'_{РФmax} = Q'_{РКmax} = Q_{ППmax} + \Delta Q, \quad (12)$$

где ΔQ – шаг итерации.

Окончательно выбранные значения параметров РФ и РК должны обеспечивать ограничение коэффициента несинусоидальности напряжения системы в наиболее напряженном режиме на допустим уровне, т.е. должно выполняться условие

$$K_{USmax} \leq K_{USdon}, \quad (13)$$

Для выработки рекомендаций по схемному решению УФКУ в составе автономных ЭЭС с ПП необходимо рассмотреть частотные характеристики сопротивлений системы.

Исходя из принципа наложения, целесообразно выполнить анализ отдельных схем замещения системы с УФКУ2 для высших гармоник, приведенных ко входам ПП и РК, которые показаны как источники высших гармоник токов $I_{Пv}$ и $I_{Кv}$ (рис. 5, а, в). Частотные характеристики соответствующих эквивалентных реактивных сопротивлений определяются из выражений

$$X_{ЭПv} = ((vX_S)^{-1} + (vX_{L0} - vX_{C0}/v)^{-1} + (vX_{L\phi} + ((vX_{PK\phi})^{-1} - v/X_{C\phi})^{-1})^{-1}, \quad (14)$$

$$X_{ЭКv} = (((vX_S)^{-1} + (vX_{L0} - vX_{C0}/v)^{-1})^{-1} + vX_{L\phi})^{-1} - v/X_{C\phi}. \quad (15)$$

Частотные характеристики имеют нули и полюсы, соответствующие режимам резонансов напряжений и токов. Представляет интерес

определение порядков частот полюсов, на которых возможно нежелательное резонансное повышение высших гармоник, генерируемых источниками.

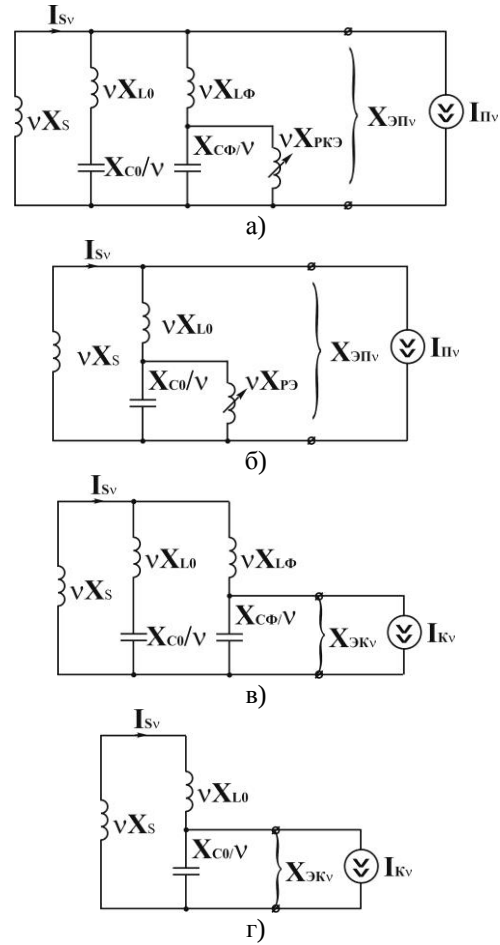


Рис.5 Эквивалентные схемы замещения системы СГ-ПП-УФКУ, приведенные соответственно ко входам ПП и РК: а, в – для системы с УФКУ2; б, г – для системы с УФКУ3

Анализ показывает, что порядки частот двух полюсов μ_1 и μ_2 , которые имеет каждая из характеристик $X_{ЭПv}$ и $X_{ЭКv}$ оказываются одинаковыми и слабо зависят от величины эквивалентного сопротивления РК. При $X_{PK\phi} = \infty$ они определяются как положительные вещественные корни биквадратного уравнения

$$Av^4 + Bv^2 + C = 0, \quad (16)$$

где

$$A = X_{L0}X_{L\phi} + X_SX_{L\phi} + X_SX_{L0},$$

$$B = X_{L0}X_{C\phi} + X_{C0}X_{L\phi} + X_SX_{C\phi} + X_SX_{C0},$$

$$C = X_{C0}X_{C\phi}.$$

Следовательно

$$\mu_1 = ((B - (B^2 - 4AC)^{1/2} / 2A)^{1/2}, \quad (17)$$

$$\mu_2 = ((B + (B^2 - 4AC)^{1/2} / 2A)^{1/2}. \quad (18)$$

На основании (17) и (18) можно установить, что

$$\mu_1 < v_{P\phi 0}; v_{P\phi 0} < \mu_2 < v_{П\phi 0}, \quad (19)$$

где $v_{П\phi 0} = \omega_{П\phi 0} / \omega$.

Наименьшие порядки высших гармоник, генерируемых ПП и РК соответственно равны

$$\nu_{I\min} = p - 1 \text{ и } \nu_{K\min} = n_k - 1. \quad (20)$$

Для исключения резонансного повышения гармоник в системе должно выполняться следующее условие согласования частотных характеристик эквивалентных сопротивлений со спектрами гармоник ПП и РК

$$(\mu_1 \& \mu_2) < (\nu_{I\min} \& \nu_{K\min}). \quad (21)$$

Нетрудно убедиться, что для системы с УФКУ2 (рис.1,в) это условие практически всегда не соблюдается по отношению к гармоникам ПП. Например, при $p = 6$ и $n_k = 396$ ($f_k = 19800$ Гц) в соответствии с (20) $\nu_{I\min} = 5$ и $\nu_{K\min} = 395$. Порядки частот настройки РФ и ПФ в соответствии с изложенным выше составляют $\nu_{P\Phi 0} = 5$, $\nu_{P\Phi 0} \leq 0,1 \nu_{K\min} = 39$.

При этом согласно (19) $\mu_1 < 5$, а $5 < \mu_2 < 39$. Таким образом, использование отдельного «легкого» помехозащитного фильтра для РК создает дополнительный полюс частотной характеристики системы порядок которого $\mu_2 > \nu_{I\min}$. Поэтому в схеме УФКУ2, представленной на рис.1,в и обеспечивающей эффективное снижение высокочастотных гармоник, создаваемых РК, возникают условия для резонансного повышения сравнительно низкочастотных гармоник, генерируемых ПП. Указанный недостаток можно устранить, используя усовершенствованную схему УФКУЗ (рис.1,г), в которой РК подключен непосредственно к РФ в точку соединения X_{L0} и X_{C0} . При таком схемном решении РФ с порядком частоты настройки $\nu_{P\Phi 0} = \nu_{I\min}$ одновременно выполняет две функции: силового резонансного системного фильтра по отношению к ПП и Г-образного ФНЧ по отношению к РК. Таким образом, исключается дополнительный второй полюс частотных характеристик сопротивления системы и резонансное повышение гармоник, а также достигается упрощение УФКУ. Частотные характеристики эквивалентных реактивных сопротивлений системы с усовершенствованным УФКУЗ относительно ПП и РК определяются в соответствии со схемами замещения (рис.5,б,г) из выражений

$$X_{ЭП\nu} = ((\nu X_S)^{-1} + (\nu X_{L0} - ((\nu X_{PKЭ})^{-1} - \nu / X_{C0})^{-1})^{-1}, \quad (22)$$

$$X_{ЭК\nu} = ((\nu(X_S + X_{L0}))^{-1} - \nu / X_{C0})^{-1}. \quad (23)$$

Дополнительный анализ показывает, что при переходе от УФКУ2 к УФКУЗ и неизменных параметрах РФ, исходя из условия полной компенсации реактивной мощности, величина X_{LK} должна быть уменьшена в $\nu_{P\Phi 0}^2 / (\nu_{P\Phi 0}^2 - 1)$ раз (на 4%). При этом порядок частоты нуля характеристики сопротивления системы

увеличивается по сравнению с $\nu_{P\Phi 0}$ в $\sqrt{1 + 1/\nu_{P\Phi 0}^2}$ раз (на 2%), что практически не влияет на эффективность снижения высших гармоник. Поэтому, изложенный выше метод определения основных параметров УФКУ2 применим и для УФКУЗ.

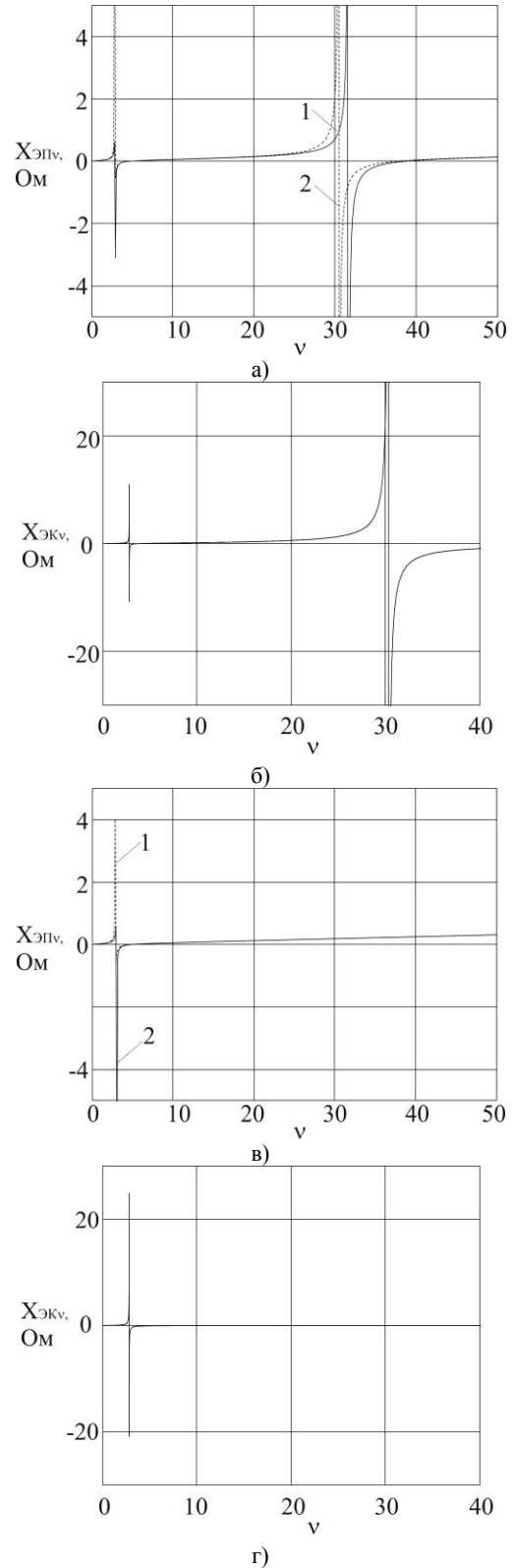


Рис.6 Частотные характеристики эквивалентных реактивных сопротивлений системы $X_{ЭП\nu}$ и $X_{ЭК\nu}$: а,б – для системы с УФКУ2; в,г – для системы с УФКУЗ

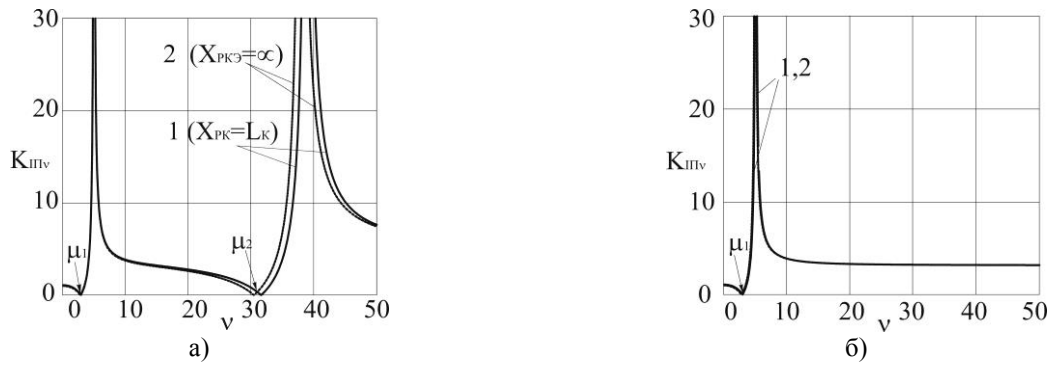


Рис.7 Частотные характеристики коэффициентов снижения гармоник токов K_{IIv} :

а) для УФКУ2; б) для УФКУ3

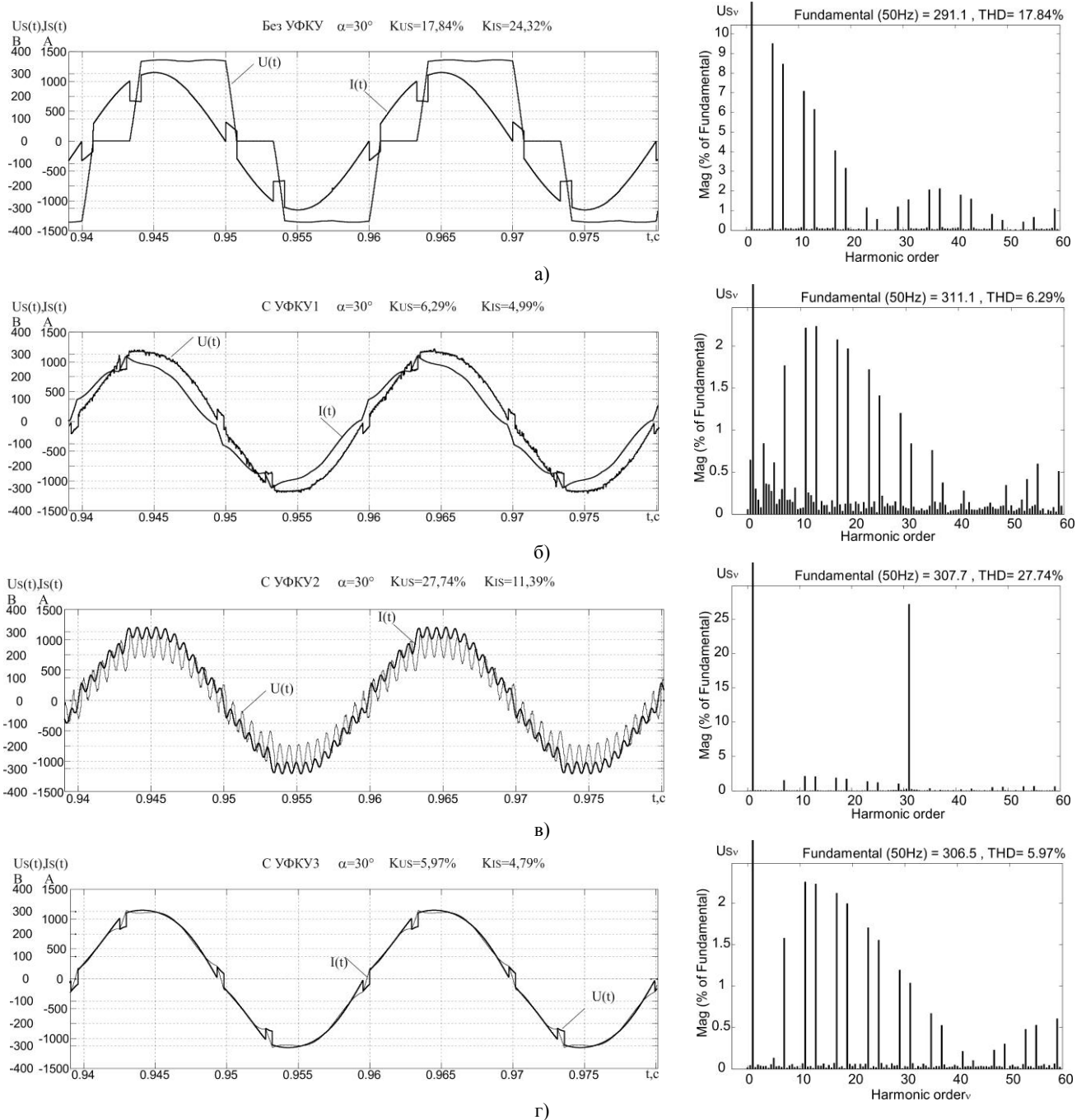


Рис.8 Результаты моделирования ЭЭС с ПП: а) без ФКУ; б) ФКУ1 (фазовое регулирование РК); в) ФКУ2 (ШИР с отдельным ФНЧ для РК); г) ФКУ3 (ШИР с использованием РФ в качестве ФНЧ для РК)

Таблица 1

Коэффициенты несинусоидальности напряжения K_{US} и тока K_{IS} генератора
в автономной ЭЭС с ПП

Угол управления ТП	Без ФКУ		УФКУ1		УФКУ2		УФКУ3	
	$K_{US}, \%$	$K_{IS}, \%$	$K_{US}, \%$	$K_{IS}, \%$	$K_{US}, \%$	$K_{IS}, \%$	$K_{US}, \%$	$K_{IS}, \%$
$\alpha_1 = 30^\circ$	17,84	24,32	6,29	4,99	27,74	11,39	5,97	4,79
$\alpha_2 = 60^\circ$	23,47	26,55	8,96	9,95	34,28	24,06	8,61	9,54

Используя полученные выражения частотных характеристик $X_{\mathcal{E}IV}$, $X_{\mathcal{E}KV}$ – (14), (15) и (22), (23), можно определить частотные зависимости коэффициентов снижения гармоник токов ПП и РК для систем с исследуемыми ФКУ:

$$K_{IIIv} = I_{IV}/I_{Sv} = |vX_S/X_{\mathcal{E}IV}|, \quad (24)$$

$$K_{IKv} = I_{KV}/I_{Sv} = |vX_S/X_{\mathcal{E}KV}|. \quad (25)$$

Сравнительный анализ частотных характеристик и гармонических искажений напряжений и токов автономной ЭЭС с ПП выполнялся по результатам соответствующих аналитических расчетов и моделирования для различных вариантов УФКУ. В качестве исходных приняты следующие схемные и режимные параметры $U_\Phi = 220 \text{ В}$, $X_S = 0,02 \text{ Ом}$, $X_{II} = 0,01 \text{ Ом}$, $p = 6$, $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$, $I_{dHOM} = 1400 \text{ А} = \text{const}$ при $\alpha = 0..90^\circ$.

Расчетные параметры УФКУ с ШИР определены в соответствии с приведенной выше методикой.

$$X_{C0} = 0,227 \text{ Ом}, \quad X_{P0} = 9,07 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

$$X_{LK} = 0,218 \text{ Ом}, \quad f_k = 19800 \text{ Гц}, \quad X_{C\Phi} = 15,7 \text{ Ом},$$

$$X_{L\Phi} = 0,011 \text{ Ом}.$$

Расчетные частотные характеристики эквивалентных реактивных сопротивлений для систем с УФКУ2 и УФКУ3 представлены на рис.6,а,б и рис.6,в,г соответственно. Графики частотных зависимостей коэффициентов снижения гармоник токов ПП приведены на рис.7. Показаны граничные положения характеристик (кривые 1,2), соответствующие значениям $X_{PK\mathcal{E}} = X_{LK}$ и $X_{PK\mathcal{E}} = \infty$. Для системы с УФКУ2 характеристика $X_{\mathcal{E}IV}$ имеет 2 полюса: $\mu_1 = 2,8$ и $30,65 \leq \mu_2 \leq 31,75$, а коэффициент снижения гармоник $K_{IIIv} < 1$ в диапазоне $27,9 < v < 33,3$. Следовательно, при использовании УФКУ2 возможно резонансное повышение гармоник 29 и 31 порядков, генерируемых ПП. В системе с УФКУ3 единственный полюс характеристики $X_{\mathcal{E}IV}$ $\mu_1 \approx 2,8$ находится левее $v_{I\min} = 5$. Поэтому для этого варианта резонансное повышение гармоник невозможно.

Из рис 7,б следует, что при $v = 5$ $K_{IIIv} \rightarrow \infty$, а в диапазоне $5 < v < \infty$ $K_{IIIv} \geq 3,33$, т.е. УФКУ3, полностью устраняя 5-ю гармонику, обеспечивает эффективное снижение всех остальных высших гармоник, генерируемых ПП. Расчет K_{IKv} по (25) показывает, что УФКУ3 также обеспечивает

снижение высокочастотных гармоник, генерируемых РК, более чем в 20000 раз.

Для сравнения эффективности УФКУ сводные результаты моделирования указанных вариантов и режимов в пакете MATLAB (Simulink) представлены значениями коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока генератора (сети) в табл. 1, а также соответствующими временными графиками и спектрами на рис. 8. Модельный эксперимент соответствует результатам теоретического анализа.

Выводы.

1. Использование всех рассмотренных вариантов УФКУ обеспечивает практически полную компенсацию реактивной мощности, то есть устранение фазового сдвига основных гармоник напряжения сети и потребляемого тока ($\cos \varphi_{(1)} = 1$).

2. Использование УФКУ1 и УФКУ3 обеспечивает существенное снижение коэффициентов несинусоидальности напряжения генератора (сети) по сравнению с вариантом без компенсации (соответственно в 2,84 и 2,98 раз). Однако, УФКУ3 имеет несомненное преимущество – уменьшение времени задержки регулирования в 200 раз.

3. Применение в составе УФКУ2 РК с ШИР и отдельным помехозащитным фильтром приводит к значительному увеличению коэффициентов несинусоидальности напряжения (в 1,55 раза) по сравнению со случаем без компенсации за счет резонансного повышения гармоники 31-го порядка. Указанное явление объясняется тем, что отдельный помехозащитный фильтр низких частот, эффективно снижая гармоники, генерируемые ШИР РК, одновременно обуславливает возникновение полюса частотной характеристики сопротивления системы на частоте 31-го порядка, то есть режима резонанса соответствующих гармоник тока, генерируемых ПП. Таким образом, применение схемного варианта УФКУ2 нецелесообразно.

4. Результаты моделирования подтверждают справедливость полученных условий согласования частотных характеристик системы со спектрами гармоник ПП и РК, в соответствии с которыми наиболее эффективным является вариант усовершенствованного УФКУ3, в котором РК с ШИР подключается к точке соединения реактора и конденсатора РФ. В этом случае отпадает необходимость использования отдельного помехозащитного фильтра, поскольку ветвь с сопротивлениями X_{L0} и X_{C0} одновременно выполняет функции как резонансного фильтра гармоник, генерируемых ПП так и Г-образного

фільтра низких частот для гармоник, генеруємих РК с ШІР

Ета схема, будучи приєрмно одинаковою по складності конфігурації с УФКУ1 (с фазовим регулюванням РК), на 4% превосходить последнюю по ефективності зниження несинусоїдальності напруги и тока СГ (компенсация мощности искажения).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сокол Е.И., Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Силовая электроника и концепция развития энергетики «smart grid» // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Харьков: «БЭТ». – 2013. – №8 (114), Т.1, Специальный выпуск. С. 7-16.
2. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями / // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 48-52.
3. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Стратегія мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням різних топологій паралельних активних фільтрів // Техн. електродинаміка. – 2014. – N1 – С.41-50.
4. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., Domke R.. Reactive power compensation technologies: State-of-the-Art review. Proceedings of the IEEE. – 2005 (Dec.). – vol. 93, no 12. – pp. 2144-2164.
5. Жук А.К. Анализ влияния сетевых фильтров на несинусоидальность напряжения в автономных электроэнергетических системах с тиристорными преобразователями // Техн. електродинаміка. Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2004. – Ч. 2 – С. 93-98.

REFERENCES

1. Sokol E.I., Zhemerov G.G., Tugay D.V. Power electronics and energy development concept «Smart Grid» // *Special issue. Energy saving. Power Engineering. Energy Audit.* – 2013. – vol. 1. – no 8 (114). – pp. 7-16.
2. Zharkin A.F., Novskiy D.O., Malakhata D.O. Hybrid filter-compensating converters for the three-phase systems with nonlinear and variable loads // *Technical electrodynamics.* – 2015. – № 4. – pp. 48-52.
3. Mikhalskiy V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Shapoval I.A. The minimization strategy of undesirable instantaneous power components with different topologies of shunt active filter // *Technical electrodynamics.* – 2014. – N1 – pp.41-50.
4. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., Domke R.. Reactive power compensation technologies: State-of-the-Art review. *Proceedings of the IEEE.* – 2005 (Dec.). – vol. 93. – no 12. – pp. 2144-2164.
5. Zhuk A.K. Investigation of network filters influence on total harmonic distortion in autonomous electric power systems with thyristor converters. *Special issue. Power electronics and power efficiency.* – 2004. – Part. 2 – pp. 93-98.

Жук Александр Кириллович¹, к.т.н., доц.,

Жук Дмитрий Александрович¹, к.т.н., доц.,

Криворучко Дмитрий Викторович¹, аспирант,

¹ Национальный университет кораблестроения им. адм.

Макарова, 54025, Николаев, пр. Героев Украины, 9,

тел/phone +38 051 2709100,

e-mail: vicedirector2012@gmail.com,

A.K. Zhuk¹, D.A. Zhuk¹, D.V. Kryvoruchko¹

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9, Heroyiv Stalingrada Avenue, Mykolaiv, 54025, Ukraine,

Adjustable power line conditioner with PWM-controlled reactive compensator.

Purpose. The certain embodiments of adjustable power line conditioners (APLC), comprised in autonomous electric power systems (EPS) with powerful semiconductor converters, was considered in this article. The basic equations for the calculation of main parameters and characteristics of APLC were presented. The comparative analysis of the embodiments of APLC was performed based on the results of computer simulation and has shown their impact on the inactive components of the total power and non-sinusoidal characteristics of voltage and current consumed by autonomous EPS. The most effective scheme of APLC is proposed, which consists of an unregulated resonant filter and controllable reactor compensator with PWM control. **Methodology.** At mathematical modelling are considered functional, mass, dimensional and cost indexes of reducers and transformers that allows observing engineering and economic aspects of speed-controlled induction electric drives. The mathematical models used for examination of the transitive electromagnetic and electromechanical processes, are grounded on systems of nonlinear differential equations with nonlinear coefficients (parameters of equivalent circuits of motors), varying in each operating point, including owing to appearances of saturation of magnetic system and current displacement in a winding of a rotor of an induction motor. For the purpose of raise of level of adequacy of models a magnetic circuit iron, additional and mechanical losses are considered. **Results.** Modelling of the several speed-controlled induction electric drives, different by components, but working on a loading equal on character, magnitude and a demanded control range is executed. At use of characteristic families including mechanical, at various parameters of regulating on which performances of the load mechanism are superimposed, the adjusting characteristics representing dependences of a modification of electrical, energy and thermal magnitudes from an angular speed of motors are gained. **Originality.** The offered complex models of speed-controlled induction electric drives with matching reducers and transformers, give the chance to realize well-founded sampling of components of drives. They also can be used as the design models by working out of speed-controlled induction motors. **Practical value.** Operating characteristics of various speed-controlled induction electric drives are observed and depending on the chosen measure including measure of cost of losses of active energy, sampling of the best alternative of the drive is realized. References 5, tables 1, figures 8.

Key words: adjustable power line conditioner (APLC), inactive components of the total power, higher harmonics, power quality, voltage and current non-sinusoidal factors, pulse-width modulation.