

Оценка эффективности шунтирующего активного фильтра при различных параметрах источника питания и нагрузки

Ю.А. СЫЧЕВ¹ ✉, Б.Н. АБРАМОВИЧ¹, В.Б. ПРОХОРОВА²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия

✉ ya_sychev@mail.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Sychev, Y. The assesement of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters / Y. Sychev, B. Abramovich, V. Prokhorova // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2020. – Vol. 10, No. 6. – P. 5621-5630. – DOI 10.11591/ijece.v10i6.pp5621-5630.

Аннотация: В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по проблемам эффективного применения шунтирующих активных фильтров для повышения качества электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости. На основе различных теорий и методов определены и проанализированы наиболее эффективные и хорошо изученные алгоритмы управления шунтирующими активными фильтрами для обеспечения их эффективного применения в системах распределенной генерации и комбинированных системах электроснабжения. Разработаны математические и компьютерные имитационные модели шунтирующих активных фильтров с различными алгоритмами управления в системах распределенной генерации и комбинированных системах электроснабжения. По результатам математического моделирования и компьютерного моделирования выявлены зависимости, отражающие влияние внутренних и внешних параметров на факторы, определяющие эффективность коррекции показателей качества электроэнергии. Определен диапазон допустимых изменений параметров шунтирующих активных фильтров с сохранением требуемого уровня эффективности коррекции качества электроэнергии при различных характеристиках системы электроснабжения, параметрах нагрузки, а также в гибридных структурах. На основе полученных диапазонов и зависимостей разработан адаптивный алгоритм функционирования в различных условиях применения для автоматического улучшения качества электроэнергии

Ключевые слова: комбинированный источник питания, распределенная генерация, гибридная структура, качество электроэнергии, шунтирующий активный фильтр.

The assesement of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters

Yuriy A. SYCHEV¹ ✉, Boris N. ABRAMOVICH¹, Veronika B. PROKHOROVA²

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² National Research University Higher School of Economics, Russia

✉ ya_sychev@mail.ru

Abstract: The results of theoretical and experimental studies on the problems of effective application of shunt active filters for power quality improvement and electromagnetic compatibility ensuring were presented in this article. Based on the different theories and methods, the most effective and well-studied control algorithms of shunt active filters were determined and analyzed to ensure their effective application in distributed generation systems and combined power supply systems. Mathematical and computer simulation models of shunt active filters with different control algorithms in distributed generation systems and combined power supply systems were developed. According to the results of mathematical modeling and computer simulation, the dependences were detected, reflecting the influences of internal and external parameters on the factors, determining the efficiency of the correction of power quality indicators. The range of permissible changes in the parameters of shunt active filters by saving the required efficiency level of power quality correction was detected under varied power supply system characteristics, load parameters and also in hybrid structures. The adaptive algorithm of the shunt active filter functioning under varied application conditions for automated power quality improvement is developed on the basis of the obtained range and dependences.

Keywords: Combined power supply; Distributed generation; Hybrid structure; Power quality; Shunt active filter.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2020 Institute of Advanced Engineering and Science. All rights reserved. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Не вызывает сомнений, что обеспечение повышения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости является критически важным в централизованных системах электроснабжения, распределенных генерирующих системах и комбинированных системах электроснабжения [1-4]. Основные негативные последствия низкого уровня качества электроэнергии для электрооборудования и систем электроснабжения хорошо известны и подробно изучены [5-10]. В частности, эта проблема становится все более актуальной в связи с интенсивным развитием технологий и принципов распределенной генерации от альтернативных и возобновляемых источников энергии и комбинированных систем электроснабжения, в которых централизованные и распределенные источники работают в параллельном режиме.

В настоящее время существует множество различных устройств и решений для улучшения качества электроэнергии. Среди них целесообразно выделить пассивные и активные устройства [5]. Пассивные устройства не так эффективны в условиях комбинированных энергосистем [7]. Активные устройства, такие как шунтирующие активные фильтры, способны улучшать качество электроэнергии в адаптивном режиме с помощью специальных методов и алгоритмов управления [9]. Однако в случае применения шунтирующих активных фильтров в условиях переменного типа источника питания и подключенной нагрузки возникает проблема правильного выбора основных параметров этих фильтров для сохранения требуемого уровня качества электроэнергии, особенно в комбинированных энергосистемах. Также очень важно выбрать оптимальный метод управления шунтирующим активным фильтром для выполнения адаптивного режима улучшения качества электроэнергии. Кроме того, активный фильтр является дорогостоящим и многофункциональным устройством для улучшения нескольких показателей качества электроэнергии. Уровень эффективности такого улучшения зависит от типа метода управления и внешних факторов [11-16].

Таким образом, в условиях комбинированных энергосистем с переменным типом и параметрами источника и нагрузки существуют следующие основные проблемы применения эффективного шунтирующего активного фильтра для улучшения качества электроэнергии [17-20]:

- Большое количество методов управления активными фильтрами, обладающих определенными преимуществами и недостатками, которые были изучены и доказаны только для специальных условий и ограничений применения.
- Возможность улучшения нескольких показателей качества электроэнергии с помощью одного многофункционального устройства, каким является активный фильтр, ограничена отсутствием универсального адаптивного алгоритма управления.
- Высокая стоимость активного фильтра, которая может быть снижена за счет правильного выбора основных параметров фильтра или их уменьшения в допустимых диапазонах в зависимости от условий применения.

В данной статье предлагается комплексное решение указанных проблем путем разработки универсального адаптивного алгоритма функционирования шунтирующего активного фильтра в условиях комбинированных энергосистем с переменными параметрами источника и нагрузки. В основу разработанного алгоритма положены полученные зависимости показателей улучшения качества электроэнергии от внутренних и внешних параметров для различных типов метода управления активным фильтром. Разработанный алгоритм и полученные зависимости являются новыми в развитии теории и практики применения активных фильтров.

Вклад предложенного решения в теорию и практику применения активных фильтров заключается в следующем:

- Улучшение работы шунтирующего активного фильтра в условиях комбинированных систем электроснабжения, когда параметры источника (централизованного или распределенного) изменяются в широком диапазоне, а также параметры подключенной нагрузки при изменении режима электроснабжения при авариях в централизованной сети.
- Возможность эффективной реализации многофункционального устройства на базе одного шунтирующего активного фильтра для улучшения нескольких показателей качества электроэнергии.
- Возможность адаптивного изменения параметров шунтирующего активного фильтра в соответствии с заданным набором внутренних и внешних факторов с сохранением требуемых показателей улучшения качества электроэнергии.

Указанное решение может быть достигнуто за счет следующего метода исследования.

2. Метод исследования

Основная идея предлагаемого метода исследования заключается в выявлении и анализе эффективности различных способов управления шунтирующим активным фильтром при изменении внешних и внутренних факторов. Здесь под внешними факторами понимаются параметры и характеристики источника питания и подключенной нагрузки, а под внутренними – параметры и характеристики шунтирующего активного фильтра. Основной целью такого метода является определение оптимального способа управления шунтирующим активным фильтром при заданном наборе различных факторов, когда этот фильтр используется как самостоятельное устройство или как часть многофункционального устройства для улучшения качества электроэнергии. Предлагаемый метод исследования состоит из трех основных этапов.

2.1. Первый этап

На первом этапе из всего многообразия существующих методов и теорий выбираются способы управления предметом для дальнейшего исследования. По результатам многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [7, 8, 21-26], разработанные способы определения и коррекции показателей качества электроэнергии для управления шунтирующими активными фильтрами можно разделить на три основные группы [27-30]:

- Способы, основанные на дискретном (ДПФ) и быстром преобразовании Фурье (БПФ) [31-35].
- Способы, в которых опорные значения тока или напряжения извлекаются с помощью теорий и методов для физических составляющих тока (ФСК) [22, 23, 36].
- Способы, основанные на фазовых преобразованиях в различных системах отсчета ($\alpha\beta$, dq , преобразования Кларка) [25].
- Способы, использующие теории и методы мгновенных компонентов мощности [24, 27] (p - q теория), разработанные Х. Акаги.
- Способы нечеткой логики [37, 38].

Все перечисленные способы были описаны, исследованы и доказаны [22-36] при особых условиях источника питания и подключенной нагрузки, однако результаты сравнительного анализа эффективности этих способов при различных условиях источника питания и подключенной нагрузки отсутствуют. Потенциальными результатами такого анализа является определение основного этапа теории структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов для улучшения качества электроэнергии на основе активных и пассивных фильтров. Также такой анализ необходим, поскольку активный фильтр является управляемой частью любой гибридной структуры. Поэтому основным методом моделирования и имитации является сравнительный анализ указанных способов при различных условиях источника питания, подключенной нагрузки и активного фильтра.

Для этого с помощью программы Matlab Simulink была разработана имитационная модель системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузкой. Также эта модель содержит шунтирующий активный фильтр с различными способами управления. Для целей моделирования были выбраны следующие распространенные способы управления шунтирующими активными фильтрами, хорошо зарекомендовавшие себя в применении [22-36]:

- Способ, основанный на p - q теории со специальным регулятором напряжения накопительного конденсатора (способ № 1).
- Способ, основанный на фазовых преобразованиях в эталонной системе $\alpha\beta$ (способ № 2).
- Способ, основанный на теории ФСК с ДРФ или БПФ (способ № 3).
- Способ, основанный на фазовых преобразованиях в эталонной системе dq (способ № 4).
- Способ, основанный на теории p - q без специального регулятора напряжения накопительного конденсатора (способ № 5).

Исходные номинальные параметры шунтирующего активного фильтра для каждого способа управления были одинаковыми.

Указанные способы управления имеют некоторые ограничения и допущения. Согласно результатам экспериментальных исследований и компьютерного моделирования [25, 34, 35], способы управления № 2 и № 4 демонстрируют максимальный уровень эффективности в условиях традиционных централизованных систем электроснабжения, где малое значение придается

внутреннему сопротивлению и мощности короткого замыкания. Способ управления № 3 позволяет эффективно устранять гармоники при постоянном уровне тока, потребляемого подключенной нелинейной нагрузкой. Как показано в некоторых публикациях [26, 39], способы управления № 1 и № 5 имеют максимальную эффективность только в условиях трехфазных трехпроводных систем. Способы управления на основе нечеткой логики [37, 38] являются современным классом алгоритмов управления активными фильтрами, эффективность которых определяется особенностями источника питания и подключенной нагрузки. Поэтому область применения таких способов ограничена.

Все параметры разработанной модели, включая параметры источника, линии электропередачи, узла нагрузки и шунтирующего активного фильтра, были одинаковыми для каждого исследуемого способа управления. Эти параметры были выбраны в соответствии с результатами экспериментальных исследований [7, 8]. Начальные параметры шунтирующего активного фильтра задавались в соответствии с оптимальным соотношением между номинальным током нелинейной нагрузки I_{nn} и номинальным током фильтра I_{saf} , выявленным в ходе экспериментальных исследований [7, 8] с использованием критерия минимизации гармоник:

$$I_{saf} = (0.5 - 0.7)I_{nn} \quad (1)$$

При моделировании параметры и настройки регуляторов системы управления активным фильтром для каждого исследуемого способа управления оставались неизменными.

2.2. Второй этап

Второй этап представляет собой указание последовательности процесса моделирования, который включает в себя следующие шаги:

- Сравнительный анализ уровня эффективности данных способов управления при изменении соотношения β активных мощностей нелинейной (NN) P_{NN} и линейной (LN) P_{LN} нагрузок в точке общего соединения (ТОС). Коэффициент корреляции β рассчитывается следующим образом

$$\beta = \frac{P_{NN}}{P_{NN} + P_{LN}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

- Сравнительный анализ эффективности этих способов управления при изменении внутреннего реактивного сопротивления источника питания X_s [39].
- Сравнительный анализ эффективности данных способов управления при изменении опорного напряжения накопительного конденсатора U_{dc} , индуктивности выходного дросселя L и емкости накопительного элемента C_{dc} шунтирующего активного фильтра.
- Сравнительный анализ эффективности этих способов управления при изменении точки подключения первичных датчиков тока и напряжения шунтирующего активного фильтра на ТОС, на клеммах нелинейной нагрузки и на стороне источника, как показано на рис. 1.

В предлагаемом методе исследования параметры C_{dc} , L и U_{dc} рассматриваются как внутренние факторы, а параметры X_s и β – как внешние факторы при анализе поведения шунтирующего активного фильтра.

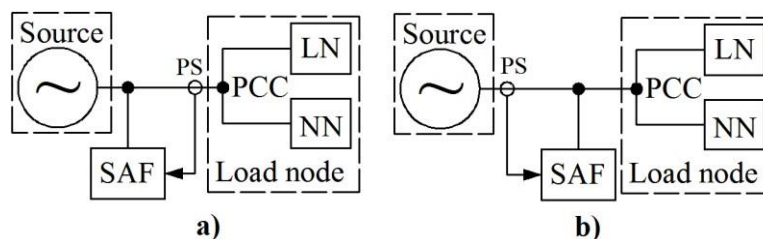


Рис. 1. Точки подключения первичных датчиков (PS) шунтирующего активного фильтра (SAF), (a) в точке общей связи (ТОС); (b) на стороне источника

2.3. Третий этап

Третий этап – определение показателей эффективности, которые отражают степень улучшения качества электроэнергии за счет применения шунтирующего активного фильтра с различными способами управления. Для оценки эффективности шунтирующего активного фильтра с различными способами управления были рассмотрены следующие показатели. Показатель степени коррекции коэффициента суммарных гармонических искажений напряжения (THD_U) определялся следующим образом:

$$\Delta THD_U = \frac{THD_U' - THD_U''}{THD_U'} \cdot 100 \% \quad (3)$$

В (3) THD_U' и THD_U'' – коэффициенты суммарных гармонических искажений [40] для напряжения в ЦТП до и после подключения шунтирующего активного фильтра. Аналогичный показатель применим для оценки степени коррекции коэффициента полных гармонических искажений тока THD_I (ΔTHD_I), а также для оценки степени коррекции коэффициентов небалансов напряжения (Δk_{U2}) и тока (Δk_{I2}) [41] для составляющих отрицательной последовательности напряжения U_{ns2} и тока I_{ns2} . Здесь следует отметить, что коэффициент небаланса напряжения k_{U2} [41] для составляющих отрицательной последовательности определяется и нормируется по российскому национальному стандарту ГОСТ 32144-2013 по качеству электроэнергии [41] следующим образом:

$$k_{U2} = \frac{U_{ns2}}{U_{ps1}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где U_{ns2} и U_{ps1} – отрицательная и положительная составляющие последовательности напряжения соответственно. Коэффициент небаланса тока k_{I2} может быть определен аналогично уравнению (4) для оценки влияния небаланса нагрузки на уровень качества электроэнергии. Показатель степени коррекции провалов и отклонений напряжения ΔU определяется по формуле

$$\Delta U_s = \frac{U_1 - U_2}{U_r} \cdot 100 \% = \frac{(U_r \pm \Delta U_1) - (U_r \pm \Delta U_2)}{U_r} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где U_r – номинальное значение напряжения сети, а U_1 и U_2 – напряжения сети до и после установки шунтирующего активного фильтра. Показатель ΔU_s позволяет определить эффективность коррекции как положительных, так и отрицательных отклонений напряжения [42, 43].

Показатель, отражающий степень снижения тока, потребляемого узлом нагрузки, за счет устранения реактивной и неактивной составляющих мощности, определяется следующим образом:

$$\Delta I_l = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где I_1 и I_2 – токи, потребляемые узлом нагрузки до и после установки шунтирующего активного фильтра.

Следовательно, значения указанных показателей эффективности покажут особенности каждого исследуемого способа управления при применении шунтирующего активного фильтра в условиях различного набора внутренних и внешних факторов [44-47]. Таким образом, все этапы представленного метода исследования позволяют получить необходимые закономерности, оценить значения представленных показателей и разработать адаптивный алгоритм управления шунтирующим активным фильтром при вариации внешних и внутренних факторов.

3. Результаты

Зависимости показателей эффективности коррекции качества электроэнергии с помощью шунтирующего активного фильтра с различными способами управления (№ 1-5) на КТС, определяемые по изменению внутреннего реактивного сопротивления источника питания X_s , представлены на рисунке 2. Аналогичные зависимости получены и для изменения других факторов C_{dc} , L , U_{dc} и β . В таблице 1 представлены результаты коррекции показателей качества электроэнергии с помощью шунтирующего активного фильтра с различными способами управления для исходных параметров источника электроэнергии, нагрузки и фильтра.

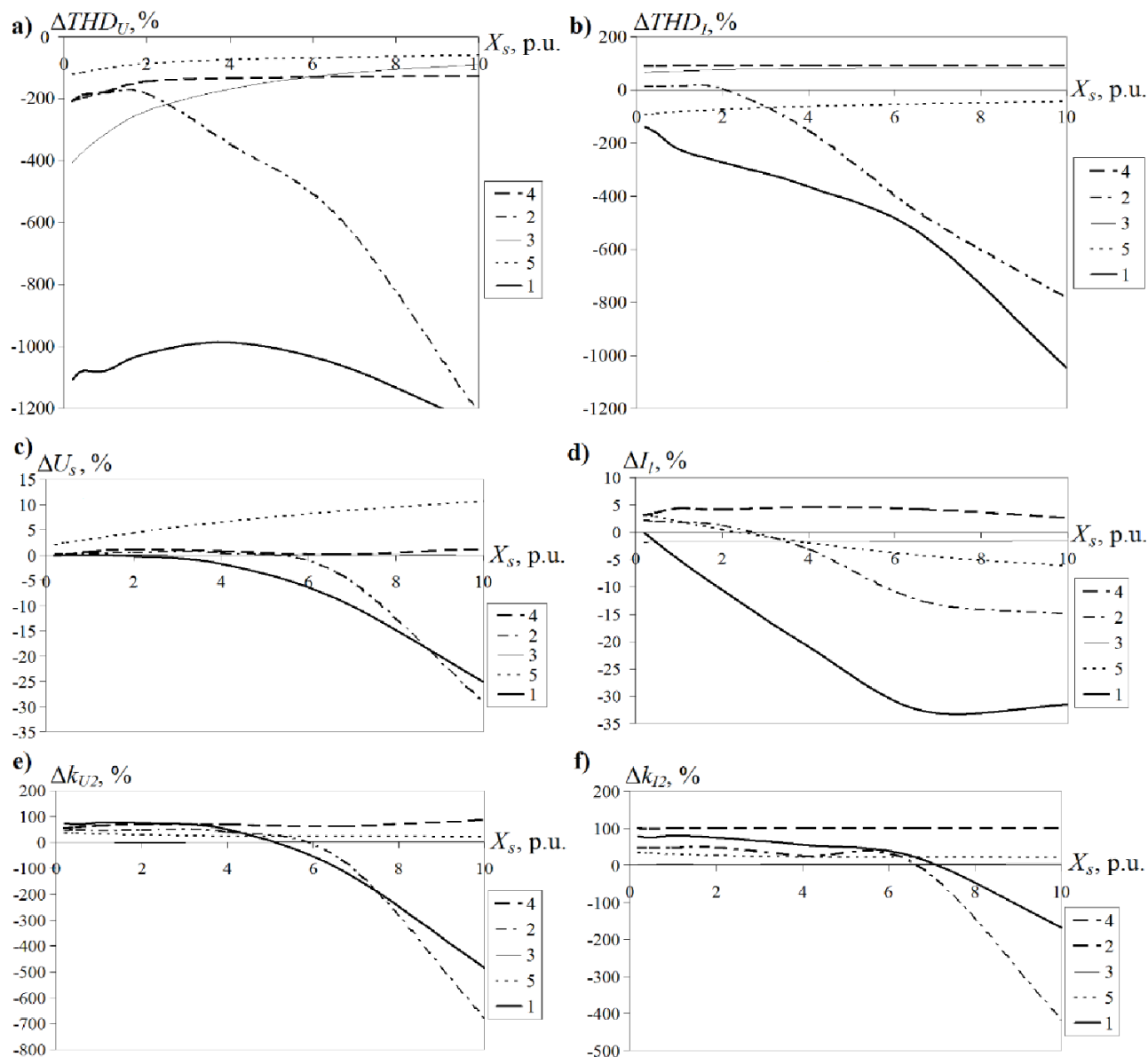


Рис. 2. Зависимости показателей эффективности коррекции качества электроэнергии в ЦТП, определяемых по изменению внутреннего реактивного сопротивления источника питания X_s , (a) $\Delta THDU$; (b) $\Delta THDI$; (c) ΔU_s ; (d) ΔI_i ; (e) Δk_{U2} ; (f) Δk_{i2}

Таблица 1

Результаты коррекции показателей качества электроэнергии

Алгоритм	ΔU_s , %	$\Delta THDU$, %	ΔI_i , %	$\Delta THDI$, %	Δk_{i2} , %	Δk_{U2} , %
#1	-0,10	-1078,6	-5,00	26,37	79,06	75,61
#2	0,39	-180,66	1,83	41,29	47,64	46,34
#3	0,07	-313,79	-1,78	80,58	2,27	0,00
#4	0,62	-192,59	4,35	93,67	99,13	63,41
#5	3,15	-101,23	2,03	-40,81	30,89	32,93

По результатам моделирования и в ходе анализа полученных закономерностей были сделаны следующие основные выводы:

- Ни один из исследованных алгоритмов не позволяет эффективно корректировать гармоники напряжения от источника при изменении внутренних и внешних факторов.
- Наиболее эффективным алгоритмом для устойчивой коррекции гармоник тока, небаланса и неактивных составляющих мощности является метод, основанный на фазовых

- преобразованиях в опорной системе dq (способ № 4). Удовлетворительный уровень эффективности этого алгоритма полностью сохраняется во всем диапазоне внутренних сопротивлений источника и внутренних параметров шунтирующего активного фильтра.
- Наиболее эффективным алгоритмом стабильной коррекции провалов и отклонений напряжения является метод, основанный на фазовых преобразованиях, использующий теорию p-q без специального регулятора напряжения накопительного конденсатора (способ № 5). Удовлетворительный уровень эффективности этого алгоритма полностью сохраняется во всем диапазоне внутренних сопротивлений источника.
 - Ни один из исследованных алгоритмов не позволяет эффективно корректировать дисбаланс напряжения источника при изменении внутренних и внешних факторов во всем диапазоне.
 - В районах с малыми значениями внутреннего сопротивления источника (традиционные системы централизованного электроснабжения) максимальной эффективностью коррекции гармоник тока обладают способы № 2, № 3 и № 4.
 - В зонах с малыми значениями внутреннего сопротивления источника (традиционные системы централизованного электроснабжения) все исследованные алгоритмы позволяют корректировать небаланс и отклонения напряжения и небаланс тока нагрузки, за исключением способа № 3.
 - В условиях изменения соотношения номинальных активных мощностей линейных и нелинейных нагрузок β в КТС наиболее эффективную коррекцию гармоник тока показывают способы № 3 и № 4.
 - В районах с большими значениями внутреннего сопротивления источника (системы распределенной генерации) наибольшую эффективность в устранении гармоник тока и неактивных составляющих тока показывает способ № 4.
 - Изменение емкости накопительного конденсатора шунтирующего активного фильтра в заданном диапазоне не оказывает существенного влияния на показатели эффективности коррекции качества электроэнергии для способов № 2, № 3, № 4.
 - Увеличение индуктивности выходных дросселей шунтирующего активного фильтра позволяет повысить эффективность коррекции гармоник напряжения и тока для всех алгоритмов. Однако для способа №2 значительное увеличение такой индуктивности приводит к резкому снижению эффективности коррекции небаланса напряжения и тока, устранения провалов напряжения и компенсации неактивных составляющих мощности.
 - Изменение опорного напряжения для накопительного конденсатора шунтирующего активного фильтра существенно влияет на показатели эффективности улучшения качества электроэнергии только в случае способа № 4.
 - Уровень эффективности шунтирующего активного фильтра в случае подключения первичных датчиков на ТОС в целом лучше, чем в случае подключения первичных датчиков на стороне источника. Однако при применении способа № 4 размещение первичных датчиков на стороне источника позволяет достичь максимального уровня эффективности коррекции отклонений напряжения по сравнению с другими алгоритмами и с размещением таких датчиков на ТОС.

Следует отметить, что полученные результаты помогают правильно выбрать способ управления шунтирующим активным фильтром в соответствии с заданными условиями его установки и применения [48-52]. Полученные результаты позволили разработать адаптивный алгоритм функционирования шунтирующего активного фильтра в различных условиях применения для автоматического улучшения качества электроэнергии. Разработанный адаптивный алгоритм представлен на рисунке 3. Данный алгоритм позволяет интегрировать шунтирующий активный фильтр в автоматизированные системы контроля и управления в качестве одного из основных элементов, участвующих в формировании информационно-управляющих взаимодействий.

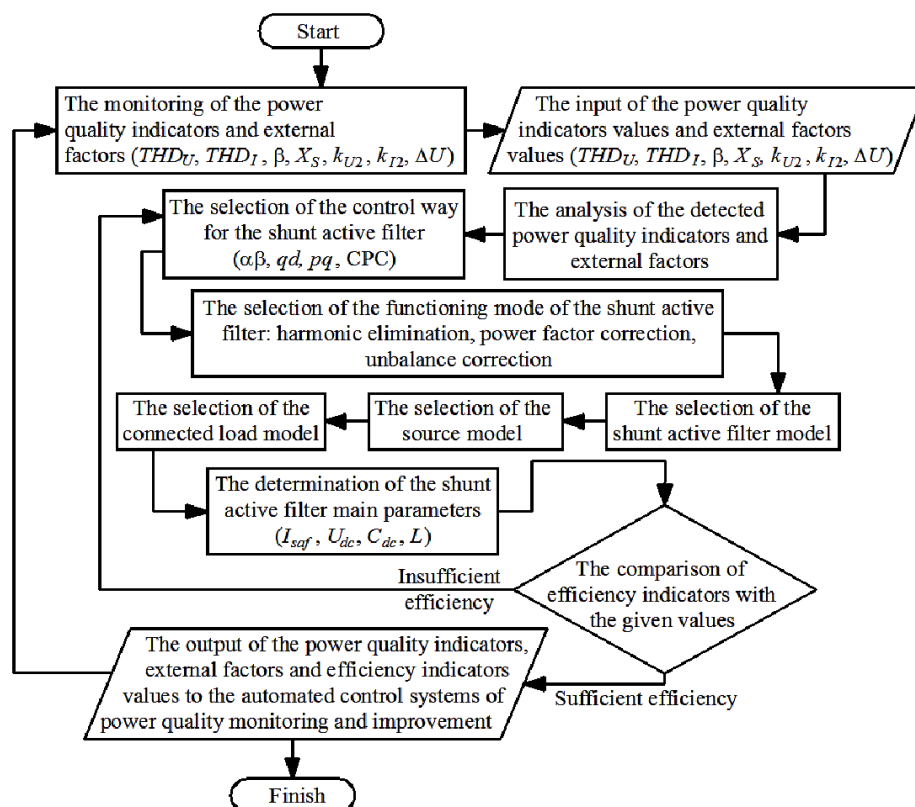


Рис. 3. Адаптивный алгоритм работы шунтирующего активного фильтра в различных условиях применения для автоматического улучшения качества электроэнергии

4. Обсуждение

Прежде всего, необходимо отметить, что проблема улучшения качества электроэнергии с помощью активных, пассивных и гибридных фильтров рассматривалась во многих научных публикациях. В этих публикациях авторы сосредоточились на структуре гибридных фильтров, алгоритме управления шунтирующими или последовательными активными фильтрами, а также на оценке эффективности тех или иных структур при заданных условиях источника питания, сети и подключенной нагрузки [1]. С теоретической точки зрения такие исследования очень полезны и могут быть положены в основу более значимых исследований.

Здесь особое внимание следует уделить современным тенденциям в электроэнергетических технологиях. Первая тенденция – комплексное применение технологий распределенной генерации на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии, таких как ветропарки, солнечные станции, микротурбинные установки, работающие на природном или попутном нефтяном газе. Вторая тенденция – технологии и методы параллельного функционирования централизованных и распределенных источников в рамках комбинированных систем энергоснабжения [39, 42, 43]. Третья тенденция – использование активных преобразователей в качестве основных элементов электротехнических комплексов альтернативных и возобновляемых источников. Четвертая тенденция – реализация нескольких различных функций в рамках одного активного преобразователя, активного фильтра или гибридного фильтра. В соответствии с указанными тенденциями, для того чтобы активные преобразователи и фильтры могли быть представлены как части электротехнического комплекса источника энергии, как элементы распределительной сети (например, UPFC) [12] и как части подключенной нагрузки, необходимо иметь единые теоретические и методические предложения по разработке и применению таких преобразователей и фильтров в различных условиях. Также нельзя не учитывать тот факт, что централизованные и распределенные системы электроснабжения обладают различными параметрами и характеристиками, которые необходимо учитывать при выборе структур, ключевых параметров и алгоритмов управления активными преобразователями, активными, пассивными и гибридными фильтрами и их применениями [33, 34]. Именно поэтому необходимо исследовать поведение активных и гибридных фильтров

при различных условиях внутреннего сопротивления источника питания, когда требуется изменить режим электроснабжения с централизованного на распределенный и наоборот в аварийных случаях в комбинированных системах электроснабжения.

Еще одной особенностью данного метода является то, что существует большое количество различных алгоритмов управления, которые могут быть использованы для активных преобразователей и фильтров как управляемых устройств, особенно для шунтирующих активных фильтров. Эти алгоритмы были созданы, описаны и апробированы во многих научных публикациях для определенных условий применения [22]-[36]. Кроме того, некоторые алгоритмы являются улучшенными версиями предыдущих аналогичных алгоритмов без существенных и минимальных изменений. Поэтому необходимо и целесообразно дать общую классификацию всех существующих и апробированных алгоритмов управления активными фильтрами и выделить наиболее эффективные и фундаментальные из них. Исходя из условий применения активных фильтров в качестве автономных устройств или в составе гибридных структур в централизованных, распределенных и комбинированных системах электроснабжения, необходимо исследовать уровни эффективности выделенных алгоритмов. Результаты таких исследований позволяют создать методику правильного выбора метода управления активными фильтрами. Также эти результаты являются ключевой частью теории структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов для улучшения качества электроэнергии на основе активных и пассивных фильтров [37-44].

Несомненно, что любая гибридная фильтрующая структура призвана снизить номинальные параметры активной части за счет правильно настроенных пассивных фильтров, поскольку активная часть является наиболее дорогостоящей. Поэтому целесообразно определить степень этого снижения в различных условиях применения и для наиболее распространенных типов гибридных структур [35, 43]. Еще одна из основных идей представленной работы – показать диапазон изменения параметров C_{dc} , L и U_{dc} , когда активный фильтр является частью гибридной структуры или работает в условиях комбинированного питания при изменении внутреннего импеданса источника питания [45-48].

Кроме того, выбирая параметры C_{dc} , L и U_{dc} для конкретных условий эксплуатации, мы не учитываем, что эти условия могут меняться (из-за сбоев в энергосистемах, неисправностей и изменений в источнике питания). Поэтому полезно и целесообразно знать диапазоны выбора параметров C_{dc} , L и U_{dc} при применении активного фильтра в сложных условиях без сброса параметров регуляторов и при сохранении эффективности работы фильтров. Активный фильтр – достаточно дорогое устройство, и он должен быть рассчитан на работу не только в особых условиях, но и в широком диапазоне условий с минимальными изменениями C_{dc} , L и U_{dc} и настроек регулятора. Также, представленные диапазоны выбора параметров C_{dc} , L и U_{dc} позволяют выявить возможное снижение стоимости активного фильтра при сохранении его рабочей эффективности [49-52].

Кроме того, при настройке активного фильтра на стороне очень сложно подобрать и настроить параметры регуляторов, если реальные параметры энергосистемы отличаются от расчетных. Этот факт был подтвержден в ходе наших экспериментальных исследований [7, 8]. Приведенные факты иллюстрируют очень важную, серьезную и актуальную проблему теории и методологии структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов для улучшения качества электроэнергии на основе активных и пассивных фильтров [43]. Представленные результаты являются лишь одним из нескольких этапов развития этой теории и методологии. Основным предметом будущих исследований в этой области является разработка теории и методологии комплексной интеграции multifunctional активных преобразователей, активных и пассивных фильтров в структуру комбинированных систем электроснабжения, работающих на основе параллельного функционирования централизованных и распределенных источников.

5. Заключение

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области правильного выбора алгоритма управления и основных параметров шунтирующего активного фильтра при изменении характеристик источника питания и подключенной нагрузки. Представленные результаты призваны помочь в разработке теории и методологии выбора структуры, содержания, режима функционирования, основных параметров и алгоритма управления электротехническими комплексами, связанными с улучшением качества электроэнергии на основе активных

и пассивных фильтров. С помощью математического моделирования и компьютерного моделирования получены зависимости показателей эффективности коррекции качества электроэнергии при различных внешних и внутренних факторах. Эти зависимости следует рассматривать как ключевой этап проектирования и развития теории и методологии структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов, связанных с улучшением качества электроэнергии на основе активных и пассивных фильтров.

Основным вкладом результатов, представленных в данной работе, является определение диапазонов, в которых могут изменяться основные параметры шунтирующих активных фильтров в рамках гибридных структур и в условиях вариации характеристик системы электроснабжения при сохранении требуемого уровня эффективности коррекции показателей качества электроэнергии. Эти диапазоны также позволяют снизить стоимость активной части, которая является наиболее дорогостоящей частью любой гибридной структуры. Выявленные зависимости и предложенный адаптивный алгоритм призваны помочь правильно выбрать структуру и способ управления шунтирующим активным фильтром при изменяющихся параметрах источника питания и характеристиках подключенной нагрузки. Также предложенный адаптивный алгоритм позволяет интегрировать шунтирующий активный фильтр в комплексные системы автоматизированного управления, контроля и улучшения качества электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.R. Salkuti, "Challenges, Issues and Opportunities for the Development of Smart Grid," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1179-1186, 2020.
2. C. Jung, P. Ray, S.R. Salkuti, "Asset Management and Maintenance: a Smart Grid Perspective," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 5, pp. 3391-3398, 2019.
3. C.M. Thuyen, "A New Design Algorithm for Hybrid Active Power Filter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 6, pp. 4507-4515, 2019.
4. V.Z. Manusov, P.V. Matrenin, N. Khasanzoda, "Swarm Algorithms in Dynamic Optimization Problem of Reactive Power Compensation Units Control," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 5, pp. 3967-3974, 2019.
5. N. Cherkaoui, et al., "Optimal Location and Reactive Power Injection of Wind Farms and SVC's Units Using Voltage Indices and PS," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 5, pp. 3407-3414, 2019.
6. S.A. Pizarro, J.E. Candelo-Becerra, F.E. Hoyos Velasco, "Optimal Parameters of Inverter-Based Microgrid to Improve Transient Response," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 1, pp. 637-650, 2020.
7. S. Narasimha, S.R. Salkuti, "An Improved Closed Loop Hybrid Phase Shift Controller for Dual Active Bridge Converter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1169-1178, 2020.
8. H. Mahieddine, et al., "Developing a Grid-Connected DFIG Strategy for the Integration of Wind Power with Harmonic Current Mitigation," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 5, pp. 3905-3915, 2019.
9. S.P. Litran, et al., "Comparative Analysis of Compensation Strategies for Series APF Based on the Electric Power Dual Formulation," *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2017*, vol. 1, pp. 199-204, 2017.
10. S.P. Litran, P. Salmeron, "Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 81-88, 2017.
11. J. Prieto Thomas, et al., "Practical Evaluation of Unbalance and Harmonic Distortion in Power Conditioning," *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 487-499, 2016.
12. A. Perez Valles, P. Salmeron Revuelta, "A New Distributed Measurement Index for the Identification of Harmonic Distortion and/or Unbalance Sources Based on the IEEE Std. 1459 Framework," *Electric Power Systems Research*, vol. 172, pp. 96-104, 2019.
13. J.P. Thomas, et al., "Assessment on Apparent Power Indices with Hybrid Active Power Filters," *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, vol. 1, pp. 181-186, 2017.
14. P.S. Revuelta, S.P. Litran, and J.P. Thomas, "Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality," *Elsevier: Amsterdam, Holland*, pp. 314-317, 2016.
15. S.P. Litran, and P. Salmeron, "Design Criteria of a Control Strategy for Hybrid Power Filters Based on Current and Voltage Detection," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 419-432, 2015.
16. A. Vinayagam, et al., "Power Quality Analysis in Microgrid: an Experimental Approach," *J. Power Energy Eng.*, vol. 4, pp. 17-34, 2016.
17. A.E. Kozyaruk, A.M. Kamyshyan, "Improving the Energy Efficiency of the Electromechanical Transmission of an Open-Pit Dump Truck," *Journal of Mining Institute*, vol. 239, pp. 576-582, 2019.
18. Y. Shklyarskiy, et al., "Distortion load identification based on the application of compensating devices," *Energies*, vol. 13, no. 6, 2020.
19. F.H. Gandoman, et al., "Review of FACTS Technologies and Applications for Power Quality in Smart Grids with Renewable Energy Systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 502-514, 2018.
20. B.N. Abramovich, et al., "The Shunt Active Filters Implementation for Power Quality Increasing in Electrical Networks of Priobskoye Deposit," *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, vol. 6, pp. 130-132, 2011.
21. B.N. Abramovich, et al., "Power Factor Correction by Means of Active Filter in Networks of Oil and Gas Enterprises," *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry*, vol. 5, pp. 88-90, 2008.
22. Y.V. Gulkov and D.A. Ustinov, "Electric Power Quality Distortions Influencing Oil Processing Plant Parameters and Characteristics," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 9, pp. 2027-2030, 2017.

23. Y.L. Zhukovskiy, et al., "The Prediction of the Residual Life of Electromechanical Equipment Based on the Artificial Neural Network," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 87, no. 3, 2017.
24. S.V. Baburin and M.S. Kovalchuk, "Analysis of Power Supply Systems Reliability for Gas Pumping Compressor Stations," *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, pp. 566-569, 2018.
25. S. Dutta, et al., "Unified Power Flow Controller Based Reactive Power Dispatch Using Oppositional Krill Herd Algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 10-25, 2016.
26. C. Yadaiah, et al., "Effect of Network Reconfiguration on Power Quality of Distribution System," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 83, pp. 87-95, 2016.
27. V. Veera Nagi Reddy, D.V. Ashok Kumar, V. Reddy Kota, "A multilevel UPQC for voltage and current quality improvement in distribution system," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 4, pp. 1932-1943, 2019.
28. M. Ochoa-Gimenez, et al., "Comprehensive Control for Unified Power Quality Conditioners," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, pp. 609-619, 2017.
29. A. Movahedi, et al., "Designing SSSC, TCSC, and STATCOM Controllers Using AVURPSO, GSA, and GA for Transient Stability Improvement of a Multi-Machine Power System with PV and Wind Farms," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 106, pp. 455-466, 2019.
30. M. Ahmad, S. Kirmani, "Performance Analysis of LMS Based Control Algorithm for Power Quality Improvement in Three Phase Grid Connected System for Linear/Non-Linear Load," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 4, pp. 1944-1950, 2019.
31. W.U.K. Tareen and S. Mekhief, "Three-Phase Transformerless Shunt Active Power Filter with Reduced Switch Count for Harmonic Compensation in Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, pp. 4868-4881, 2018.
32. Z. Zou, et al., "Frequency-Adaptive Fractional-Order Repetitive Control of Shunt Active Power Filters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, pp. 1659-1668, 2015.
33. B.N. Abramovich and Y.A. Sychev, "The Control Algorithm for Active and Hybrid Correction Systems of Voltage and Current Waveforms," in *Proceedings of the Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2016*, Omsk, Russian Federation, 2017.
34. Y.V. Gulkov, A.V. Turyшева, A.V. Kopteva, "Research of grounding systems of electrical complexes in the conditions of permafrost soils," *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019*, pp. 969-972, 2019.
35. L. Wang, et al., "Hybrid Structure of Static VAR Compensator and Hybrid Active Power Filter (SVC//HAPF) for Medium-Voltage Heavy Loads Compensation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, pp. 4432-4442, 2018.
36. T.-L. Lee, et al., "Hybrid Active Filter with Variable Conductance for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Power Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, pp. 746-756, 2015.
37. J. Solanki, et al., "Implementation of Hybrid Filter for 12-Pulse Thyristor Rectifier Supplying High-Current Variable-Voltage DC Load," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, pp. 4691-4701, 2015.
38. B.N. Abramovich, et al., "Hybrid Harmonic Compensation Device Adapted for Variable Speed Drive System," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 87, no. 3, pp. 1-6, 2017.
39. B.N. Abramovich, et al., "The Hybrid Correction System, Based on Active and Passive Filters for Harmonic Compensation in Networks of Oil Enterprises," *Proceedings of 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, pp. 1-4, 2018.
40. B.N. Abramovich, et al., "Efficiency Estimation of Hybrid Electrical Complex for Voltage and Current Waveform Correction in Power Systems of Oil Enterprises," *Proceedings of 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, pp. 397-402, 2019.
41. S. Bosch, et al., "Predictive Current Control for an Active Power Filter with LCL-filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, pp. 4943-4952, 2018.
42. Y. Babkrani, A. Naddami, M. Hilal, "A Smart Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with an Optimized Modulation Techniques Increasing the Quality and Reducing Harmonics," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 4, pp. 1852-1862, 2019.
43. A. Safa, et al., "A Robust Control Algorithm for a Multifunctional Grid Tied Inverter to Enhance the Power Quality of a Microgrid under Unbalanced Conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 100, pp. 253-264, 2018.
44. E. Khoudry, et al., "Traveling Wave Based Fault Location for Power Transmission Lines using Morphological Filters and Clarke Modal Components," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1122-1134, 2020.
45. B.I. Yassine, A. Boumediene, "Renewable Energies Evaluation and Linking to Smart Grid," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, no. 1, pp. 107-118, 2020.
46. O.O. Fares, "Log-Domain Electronically-Tuneable Fully Differential High Order Multi-Function Filter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1263-1272, 2020.
47. G.R. Prudhvi Kumar, D. Sattianadan, K. Vijayakumar, "A Survey on Power Management Strategies of Hybrid Energy Systems in Microgrid," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1667-1673, 2020.
48. A. Subramanian, Santha K.R., "Review of Multiport Isolated Bidirectional Converter Interfacing Renewable and Energy Storage System," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, no. 1, pp. 466-467, 2020.
49. T. Touni, et al., "PV Integrated Single-Phase Dynamic Voltage Restorer for Sag Voltage, Voltage Fluctuations and Harmonics Compensation," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, no. 1, pp. 547-554, 2020.
50. A. Chaitanukulwat, "Development of DC Voltage Control from Wind Turbines using Proportions and Integrals for Three-Phase Grid-Connected Inverters," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 2, pp. 1701-1711, 2020.
51. A. Umar Lawan, et al., "Power Compensation for Vector-Based Current Control of a Modular Multilevel Converter (MMC) Based STATCOM," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 4, pp. 1781-1796, 2019.
52. S. Saidah, et al., "Modelling of three phase SVPWM AC-AC converter using unity power factor control," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 4, pp. 1823-1832, 2019.