
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313**EDN ZVQRSJ****ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ 2-ГО ТИПА
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ *D-STATCOM* В РЭС С ВИЭ****А.Ф. Аккад**

ORCID: 0009-0001-4758-3739 e-mail: feras1992@yandex.ru

Университет Алеппо

Алеппо, Сирия

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижегород, Россия

Интеграция распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в распределительные электрические сети (РЭС) зачастую негативно влияет на общую эффективность энергосистемы. Стохастический характер ВИЭ вызывает колебания мощности и напряжения, а подключение ВИЭ к РЭС через полупроводниковые устройства (инверторы) ведет к появлению гармонических составляющих тока. Для повышения качества электроэнергии, поставляемой потребителям, в РЭС широко применяются *D-STATCOM*. Однако их применение в РЭС с ВИЭ представляет собой сложную задачу: динамический характер изменения параметров режима РЭС делает неэффективными традиционные алгоритмы управления, основанные на ПИ/ПИД-регуляторах. Статья посвящена повышению эффективности *D-STATCOM* за счет увеличения скорости реагирования на динамические изменения параметров РЭС с ВИЭ с помощью искусственного интеллекта (нечеткой логики). Предложен подход к управлению *D-STATCOM* на базе нечеткой логики 2-го типа, отличающийся от нечеткой логики 1-го типа большей гибкостью и способностью лучше справляться с неопределенностью. Смоделированы четыре сценария реакции РЭС с фотоэлектрической и ветроэнергетической энергоустановками на внешние возмущения: без регулирования и с управлением параметрами сети *D-STATCOM* на основе ПИ-регулятора, нечеткой логики 1-го типа, нечеткой логики 2-го типа. Результаты сравнения сценариев показали преимущество алгоритма на основе нечеткой логики 2-го типа, позволяющего улучшить регулирование напряжения в РЭС при внешних помехах.

Ключевые слова: ВИЭ, *D-STATCOM*, искусственный интеллект, качество электроэнергии, нечеткая логика, распределенная генерация.

Для цитирования: Аккад А.Ф., Соснина Е.Н. Применение нечеткой логики 2-го типа для управления *D-STATCOM* в РЭС с ВИЭ // Интеллектуальная электротехника. 2025. № 4. С. 4-22. EDN ZVQRSJ

APPLICATION OF TYPE 2 FUZZY LOGIC FOR D-STATCOM CONTROL IN DISTRIBUTED ENERGY NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

A.F. Akkad

ORCID: 0009-0001-4758-3739 e-mail: feras1992@yandex.ru
University of Aleppo
Aleppo, Syria

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The integration of distributed generation based on renewable energy sources (RES) into distribution electrical networks (DEN) often negatively affects the overall efficiency of the energy system. The stochastic nature of RES causes fluctuations in power and voltage, and connecting RES to DEN through semiconductor devices (inverters) leads to the appearance of harmonic current components. *D-STATCOM* is widely used in DEN to improve the power quality for consumers. However, their use in DEN with RES is a difficult task: the dynamic nature of the change in the mode DEN parameters makes it ineffective to use traditional control algorithms based on PI/PID controllers. The article is devoted to improving the efficiency of *D-STATCOM* by increasing the response rate to dynamic changes in the parameters of DEN with RES using artificial intelligence. An approach to managing *D-STATCOM* based on type 2 fuzzy logic is proposed, which differs from type 1 fuzzy logic in greater flexibility and the ability to better cope with uncertainty. Four scenarios of the reaction of PV and wind power plants to external disturbances are modeled: without regulation and with control of the *D-STATCOM* network parameters based on a PI controller, type 1 fuzzy logic, and type 2 fuzzy logic. The results of the scenario comparison showed the advantage of an algorithm based on type 2 fuzzy logic, which makes it possible to improve voltage regulation in the DEN with external interference.

Keywords: renewable energy sources, *D-STATCOM*, artificial intelligence, power quality, fuzzy logic, distributed generation.

For citation: A.F. Akkad and E.N. Sosnina, “Application of type 2 fuzzy logic for D-STATCOM control in distributed energy networks with renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-22, 2025. EDN ZVQRSJ

I. Введение

Известно, что возобновляемые источники энергии (ВИЭ) имеют стохастический характер, и подключение к распределительной электрической сети (РЭС) распределенной генерации (РГ) на ВИЭ вызывает в РЭС колебания мощности, а следовательно, тока и напряжения. Инверторы, с помощью которых энергоустановки (ЭУ) на ВИЭ интегрируются в системы электроснабжения (СЭС) потребителей, являются источниками гармонических составляющих [1-3], генерируемых при широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Проблему высших гармоник и колебаний напряжения позволяет решить распределенный статический синхронный компенсатор (*Distribution Static Compensator – D-STATCOM*) – регулятор напряжения на полупроводниковых элементах, относящийся к устройствам *FACTS* второго поколения и используемый в РЭС среднего или низкого напряжения вблизи потребителя [4]. Эффективность применения *D-STATCOM* в значительной степени определяется алгоритмом управления [5].

Для управления *D-STATCOM* широко используются ПИ/ПИД регуляторы, благодаря простоте реализации, ясности функционирования и низкой стоимости. Однако они медленно работают в сложных нелинейных системах с ЭУ на ВИЭ [6, 7]. Известно [8, 9], что традиционные ПИ-регуляторы характеризуются медленным откликом в нелинейных системах (при внезапных изменениях параметров сети). Для повышения быстродействия *D-STATCOM* необходимы мощные контроллеры, совместимые с нелинейными динамическими изменениями.

Повысить эффективность *D-STATCOM* в РЭС с ВИЭ можно с помощью регуляторов на основе искусственного интеллекта (нечеткой логики), не требующих решения сложных дифференциальных уравнений n -порядка, описывающих нелинейные системы. Регулятор на нечеткой логике, в отличие от традиционного ПИ-регулятора, не требует математической модели, а, следовательно, имеет лучшую реакцию и быстрое время отклика при работе в системах с нелинейными внешними воздействиями [10, 11]. Известные системы нечеткой логики для управления *D-STATCOM*, как правило, основаны на концепции нечетких множеств 1-го типа (*Fuzzy-1*) [12], что часто не обеспечивает достоверные решения из-за недостаточно обоснованного выбора входных данных моделирования и не позволяет адекватно описать имеющуюся неопределенность. Системы нечеткой логики 2-го типа (*Fuzzy-2*) позволяют работать с большей неопределенностью [13, 14].

На рис. 1 показана структурная схема алгоритма управления *D-STATCOM* с помощью метода мгновенной мощности ($p-q$ теория), использующего преобразование Кларк для перехода от однофазной системы токов и напряжений к двухфазной системе (α, β) [15].

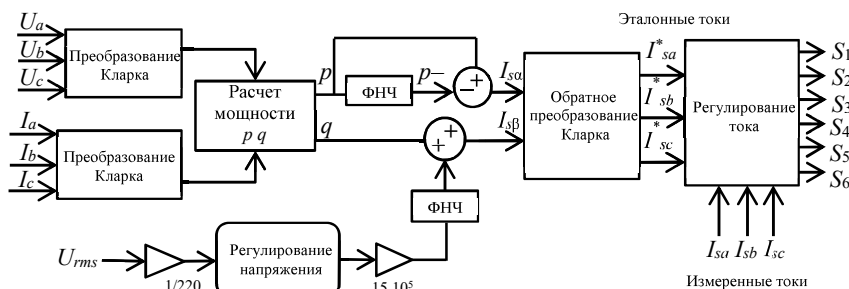


Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления *D-STATCOM*:
ФНЧ – фильтр низких частот

Fig. 1. Structural diagram of the *D-STATCOM* control algorithm:
ФНЧ – Low Pass Filter

Обратное преобразование Кларк используется для получения трехфазных эталонных (опорных) токов, которые с помощью контроллера сравниваются с измеренными значениями для получения импульсов управления транзисторами *D-STATCOM*.

Цель исследования – разработка алгоритма управления *D-STATCOM* на основе нечеткой логики 2-го типа (*Fuzzy-2*) и анализ его эффективности при подключении *D-STATCOM* к РЭС с источниками распределенной генерации (фотоэлектрической (ФЭУ) и ветроэнергетической (ВЭУ) установок). Исследование направлено на повышение качества электроэнергии, поставляемой потребителю, за счет снижения колебаний напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока $THDi$ %.

II. Применение нечеткой логики

Алгоритм управления *D-STATCOM* моделировался на основе нечеткой логики с использованием регуляторов напряжения (на основе метода Мамдани) и тока (на основе метода Сугено). На рис. 2 а показана модель алгоритма управления напряжением *D-STATCOM* с регулятором на основе нечеткой логики (метод Мамдани). Напряжение измеряется, преобразуется и поступает на вход регулятора, выход которого представляет собой реактивную мощность (РМ). Фильтр низких частот обеспечивает получение необходимого значения РМ.

На рис. 2 б показана модель алгоритма управления током при широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для регулирования тока использовались три нечетких регулятора на основе метода Сугено (по одному на каждую фазу).

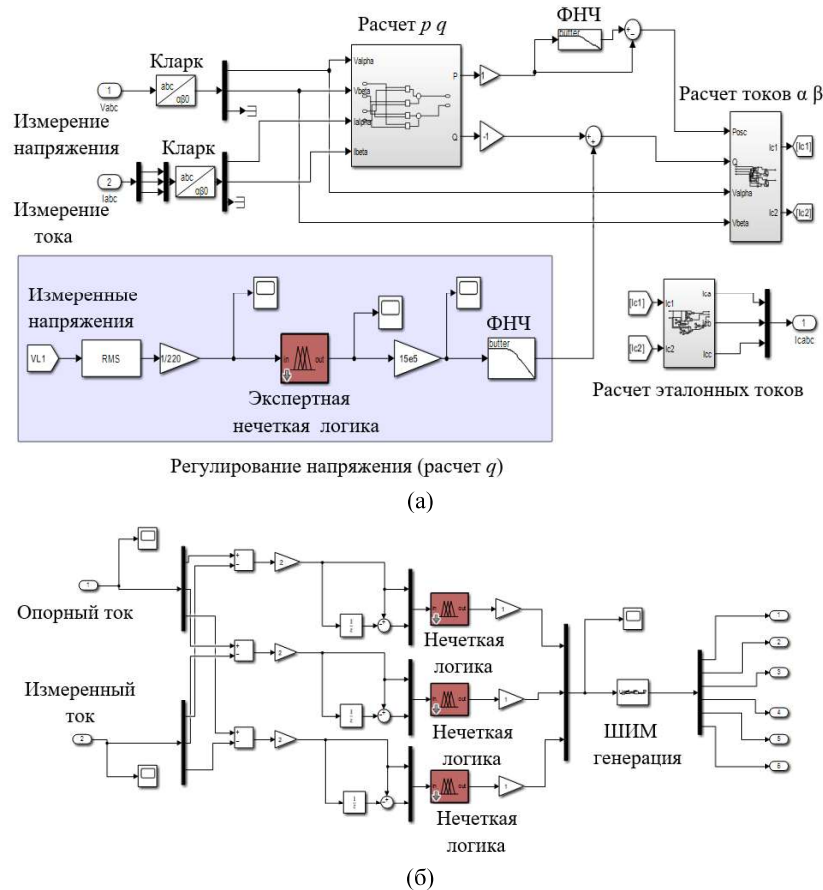


Рис. 2. Модели управления *D-STATCOM* с контроллерами на основе алгоритмов:

а – Мамдани (для регулирования напряжения);
б – Сугено (для регулирования тока)

Fig. 2. *D-STATCOM* controls with controllers based on algorithms:
a – Mamdani (for voltage regulation); *b* – Sugeno (for current regulation)

Регулятор напряжения на основе нечеткой логики (Мамдани) состоит из входа («напряжение») и выхода («реактивная мощность»). В соответствии с лингвистическими переменными, для регулирования напряжения необходимо разработать пять нечетких логических правил. Для обозначения лингвистической переменной «напряжение» примем пять терм: БП – большое пониженное; НП – небольшое пониженное; Н – нормальное; НВ – небольшое повышенное; БВ – большое повышенное. Для обозначения лингвистической переменной «реактивная мощность» примем также пять терм: БГ – большая генерация РМ; НГ – небольшая генерация РМ; Н – РМ не генерируется и не поглощается; НПО – небольшое потребление РМ; БПО – большое потребление РМ.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «напряжение» E_{1i} :

$E_{11} = \text{БП}$	(большое падение напряжения)	$\Delta(v, \mu_{11}(v));$
$E_{12} = \text{НП}$	(небольшое падение напряжения)	$\Delta(v, \mu_{12}(v));$
$E_{13} = \text{Н}$	(нормальное напряжение)	$\Delta(v, \mu_{13}(v));$
$E_{14} = \text{НВ}$	(небольшое высокое напряжение)	$\Delta(v, \mu_{14}(v));$
$E_{15} = \text{БВ}$	(большое высокое напряжение)	$\Delta(v, \mu_{15}(v));$

где $E_{11}, E_{12}, \dots, E_{15}$ – подмножества; Δ – вид функции принадлежности; v – переменная напряжения; $\mu_{1i}(v)$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности значения напряжения v к лингвистическому терму i .

Функция принадлежности принимает значения в интервале от 0 до 1, указывая на степень соответствия данного значения определенному лингвистическому описанию.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «реактивная мощность» E_{2j} :

$E_{21} = \text{БГ}$	(большая генерация РМ)	$\Delta(q, \mu_{21}(q));$
$E_{22} = \text{НГ}$	(небольшая генерация РМ)	$\Delta(q, \mu_{22}(q));$
$E_{23} = \text{Н}$	(РМ не генерируется и не поглощается)	$\Delta(q, \mu_{23}(q));$
$E_{24} = \text{НПО}$	(небольшое поглощение РМ)	$\Delta(q, \mu_{24}(q));$
$E_{25} = \text{БПО}$	(большое поглощение РМ)	$\Delta(q, \mu_{25}(q));$

где q – реактивная мощность; $\mu_{2j}(q)$ – функция принадлежности, отображающая степень принадлежности значения РМ q к каждому из лингвистических термов.

На рис. 3 показаны нечеткие подмножества 1-го типа лингвистических переменных «напряжение» (вход) и «реактивная мощность» (выход).

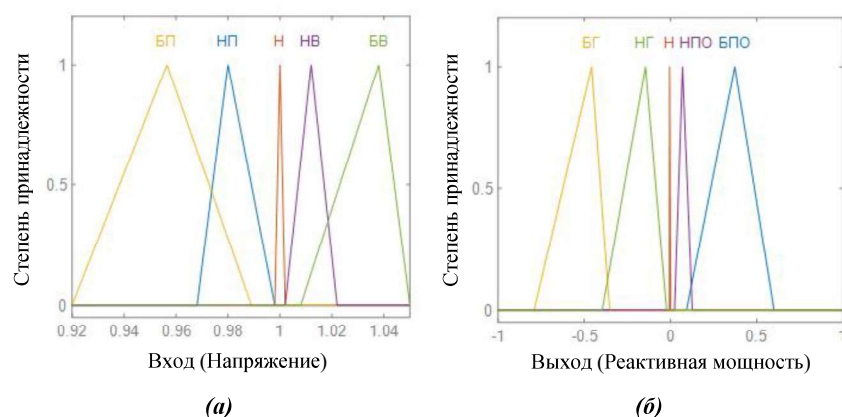


Рис 3. Функция принадлежности (тип 1) для регулирования напряжения:
а – вход (напряжение); б – выход (реактивная мощность)

Fig. 3. Membership function (type 1) for voltage regulation:
a – input (voltage); б – output (reactive power)

Регулятор тока на основе нечеткой логики (Сугено) состоит из двух входов («ошибка» и «изменение ошибки») и одного выхода («постоянные значения»). В соответствии с лингвистическими переменными, для регулирования тока необходимо составить 49 нечетких логических правил.

Так, для лингвистических переменных «Ошибка», «Изменение Ошибки» и «постоянные значения» семь терм: БО – большое отрицательное; СО – среднее отрицательное; НО – небольшое отрицательное; Н – нулевое; НП – небольшое положительное; СП – среднее положительное; БП – большое положительное.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «Ошибка» E_{1i} :

E_{11} = БО	(большая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{11}(\varepsilon(I)))$;
E_{12} = СО	(средняя отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{12}(\varepsilon(I)))$;
E_{13} = НО	(небольшая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{13}(\varepsilon(I)))$;
E_{14} = Н	(нулевая)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{14}(\varepsilon(I)))$;
E_{15} = НП	(небольшая положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{15}(\varepsilon(I)))$;
E_{16} = СП	(средняя положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{16}(\varepsilon(I)))$;
E_{17} = БП	(большая положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{17}(\varepsilon(I)))$,

где $\Omega(\varepsilon, \mu_{1i}(\varepsilon(I)))$ – функция принадлежности; ε – ошибка тока; $\mu_{1i}(\varepsilon(I))$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности ошибки тока к соответствующему лингвистическому терму.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «Изменение ошибки» E_{2j} :

$E_{21} = \text{БО}$	(большое отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{21}(\varepsilon(I)))$;
$E_{22} = \text{СО}$	(среднее отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{22}(\varepsilon(I)))$;
$E_{23} = \text{НО}$	(небольшое отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{23}(\varepsilon(I)))$;
$E_{24} = \text{Н}$	(нулевое)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{24}(\varepsilon(I)))$;
$E_{25} = \text{НП}$	(небольшое положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{25}(\varepsilon(I)))$;
$E_{26} = \text{СП}$	(среднее положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{26}(\varepsilon(I)))$;
$E_{27} = \text{БП}$	(большое положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{27}(\varepsilon(I)))$,

где $\Delta\varepsilon$ – изменение ошибки тока I ; $\mu_{2j}(\Delta\varepsilon(I))$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности изменения ошибки тока к соответствующему лингвистическому терму.

На рис. 4 показаны нечеткие подмножества лингвистических переменных «Ошибка» и «Изменение ошибки».

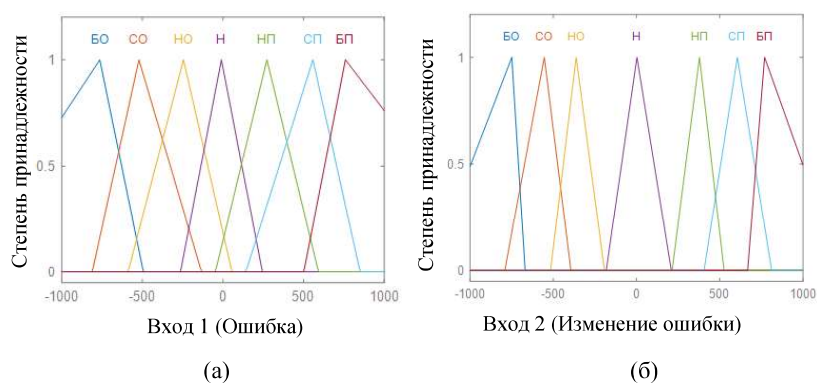


Рис 4. Функция принадлежности (тип 1) для регулирования тока:

a – вход (ошибка); б – выход (изменение ошибки)

Fig. 4. Membership function (type 1) for current regulation:

a – input (error); б – output (change in error)

Выходные постоянные значения параметров для регулятора тока: БО: 150; СО: 110; НО: 75; Н: 0; НП: 75; СП: 110; БП: 150.

Нечеткие правила регулирования напряжения при одной входной и одной выходной переменных:

- ЕСЛИ напряжение БП, ТО реактивная мощность БГ;
- ЕСЛИ напряжение НП, ТО реактивная мощность НГ;
- ЕСЛИ напряжение Н, ТО реактивная мощность Н;
- ЕСЛИ напряжение НВ, ТО реактивная мощность НПО;

– ЕСЛИ напряжение БВ, ТО реактивная мощность БПО.

В табл. 1 приведена база нечетких правил регулирования тока.

Таблица 1.
База правил (для тока)

Table 1.
Rule base (for current)

Вход 2	Вход 1						
	БО	СО	НО	Н	НП	СП	БП
БО	БО	БО	СО	СО	СО	НО	Н
СО	БО	БО	НО	СО	НО	Н	НП
НО	БО	СО	НО	НО	Н	НП	СП
Н	СО	СО	НО	Н	НП	СП	БП
НП	НО	НО	Н	НП	НП	СП	БП
СП	НО	Н	НП	СП	СП	БП	БП
БП	Н	НП	СП	БП	БП	БП	БП

Используется пять правил для достижения желаемой производительности системы для регулирования напряжения и 49 правил для регулирования тока. При дефазификации используется метод центра тяжести для регулятора Мамдани и метод взвешенного среднего для Сугено.

Нечеткая логика 2-го типа (*Fuzzy-2*) была введена Заде как развитие *Fuzzy-1* [16]. Функция принадлежности интервального типа 2 определяется верхней и нижней функциями принадлежности. Верхняя функция принадлежности (ВФП) эквивалентна традиционной функции принадлежности *Fuzzy-1*. Нижняя функция принадлежности (НФП) меньше или равна верхней функции принадлежности для всех возможных входных значений. Область между ВФП и НФП является следом неопределенности. *Fuzzy-2* имеет ту же конфигурацию, что и *Fuzzy-1*, но требует дополнительной операции, являющейся редукцией типа. Структурная схема *Fuzzy-2* регулирования включает пять основных этапов: Фаззификация, База правил, Система вывода, Редукция типа, Дефаззификация.

На этапе Фаззификации измеренные входные данные преобразуются в нечеткие лингвистические значения (нечеткое множество 2-го типа). Нечеткие множества 2-го типа обладают двумя функциями принадлежности для каждой лингвистической переменной, поэтому здесь вводится дополнительный уровень неопределенности по сравнению с нечеткими множествами 1-го типа, где фактическое значение связано с интервалом степеней сходства [17].

Две функции принадлежности связаны с каждой лингвистической переменной, которая имеет характерную заштрихованную область, извест-

ную как след неопределенности *FOU* (*Footprint of Uncertainty*). Он описывает неопределенность относительно степеней сходства [18]. Для регулирования напряжения входные и выходные переменные расширяются до треугольных функций принадлежности интервального 2-го типа.

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «напряжение» E_{1i} :

E_{11} = БП	(большое пониженное)	$\Delta(v, (\mu_{-11}^-(v), \mu_{-11}(v)))$;
E_{12} = НП	(небольшое пониженное)	$\Delta(v, (\mu_{-12}^-(v), \mu_{-12}(v)))$;
E_{13} = Н	(нормальное)	$\Delta(v, (\mu_{-13}^-(v), \mu_{-13}(v)))$;
E_{14} = НВ	(небольшое повышенное)	$\Delta(v, (\mu_{-14}^-(v), \mu_{-14}(v)))$;
E_{15} = БВ	(большое повышенное)	$\Delta(v, (\mu_{-15}^-(v), \mu_{-15}(v)))$;

где $\mu_{-1i}^-(v)$, $\mu_{-1i}(v)$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности значения напряжения v к лингвистическому терму i .

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «реактивная мощность»:

E_{21} = БГ	(большая генерация РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-21}^-(q), \mu_{-21}(q)))$;
E_{22} = НГ	(небольшая генерация РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-22}^-(q), \mu_{-22}(q)))$;
E_{23} = Н	(РМ не генерируется и не поглощается)	$\Delta(q, (\mu_{-23}^-(q), \mu_{-23}(q)))$;
E_{24} = НПО	(небольшое поглощение РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-24}^-(q), \mu_{-24}(q)))$;
E_{25} = БПО	(большое поглощение РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-25}^-(q), \mu_{-25}(q)))$;

где $\mu_{-2i}^-(q)$, $\mu_{-2i}(q)$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности значения РМ q каждому из лингвистических термов.

На рис. 5 показаны нечеткие подмножества 2-го типа лингвистических переменных «напряжение» (вход) и «РМ» (выход). Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «Ошибка»:

E_{11} = БО	(большая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-11}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-11}(\varepsilon(I))))$;
E_{12} = СО	(средняя отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-12}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-12}(\varepsilon(I))))$;
E_{13} = НО	(небольшая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-13}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-13}(\varepsilon(I))))$;
E_{14} = Н	(нулевая)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-14}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-14}(\varepsilon(I))))$;
E_{15} = НП	(небольшая положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-15}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-15}(\varepsilon(I))))$;
E_{16} = СП	(средняя положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-16}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-16}(\varepsilon(I))))$;
E_{17} = БП	(большая положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-16}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-16}(\varepsilon(I))))$;

где $\mu_{-1i}^-(\varepsilon(I))$, $\mu_{-1i}(\varepsilon(I))$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности ошибки тока соответствующему лингвистическому терму.

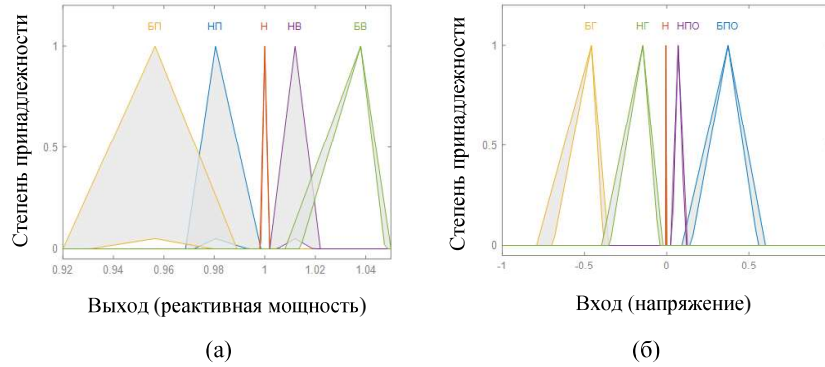


Рис. 5. Функция принадлежности (тип 2):
а – вход (напряжения); б – выход (реактивная мощность)

Fig. 5. Membership function (type 2):
a – input (voltage); б – output (reactive power)

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «Изменение ошибки»:

$E_{21} = \text{БО}$	(большое отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-21}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-21}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{22} = \text{СО}$	(среднее отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-22}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-22}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{23} = \text{НО}$	(небольшое отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-23}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-23}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{24} = \text{Н}$	(нулевое)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-24}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-24}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{25} = \text{НП}$	(небольшое положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-25}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-25}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{26} = \text{СП}$	(среднее положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-26}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-26}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{27} = \text{БП}$	(большое положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-27}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-27}(\Delta\varepsilon(I))))$;

где $\mu_{-21}^-(\Delta\varepsilon(I))$, $\mu_{-21}(\Delta\varepsilon(I))$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности изменения ошибки тока соответствующему лингвистическому терму.

На рис. 6 показано нечеткие подмножества лингвистических переменных «Ошибка» (вход 1) и «Изменение ошибки» (вход 2).

База правил. Нечеткие правила *Fuzzy-2* остаются такими же, как и в *Fuzzy-1*, но antecedentes и последствия будут представлены нечеткими множествами интервального 2-го типа.

Общая форма правила в системе *Fuzzy-2* может быть представлена как

$$N_i: \text{Если } X_1 \text{ это } A_1 \text{ И } X_2 \text{ это } A_2, \text{ ТО } Y \text{ это } [B_i^-, B_i^+] \quad (1)$$

где N_i – i -число правило; X_1 , X_2 – входные переменные; A_1 , A_2 – нечеткие множества 2-го типа интервала (каждое определяется верхней и нижней функциями принадлежности); Y – выходная переменная; $[B_i^-, B_i^+]$ – интервал

выходного нечеткого множества, указывающий диапазон возможных значений принадлежности.

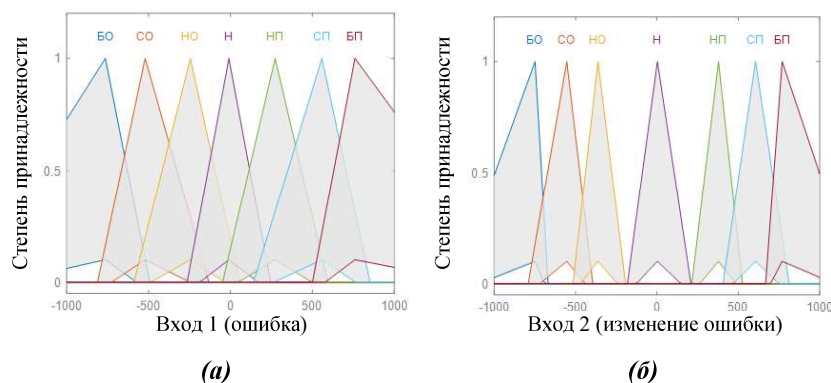


Рис. 6. Функция принадлежности (тип 2):

a – вход 1 (ошибка); б – вход 2 (изменение ошибки)

Fig. 6. Membership function (type 2):

a – input 1 (error); b – input 2 (change in error)

Компоненты нечетких правил интервального 2-го типа следующие.

Входные переменные: каждая входная переменная может принимать значения в определенном диапазоне и описывается ее нечетким множеством.

Нечеткие множества: определяются как нечеткие множества интервального 2-го типа, что означает, что для каждого входа существуют нижние и верхние функции принадлежности, которые описывают, как входное значение принадлежит нечеткому множеству.

Выходной интервал: выходные данные выражаются в виде интервала, обозначающего диапазон значений принадлежности, что позволяет устранить неопределенность.

Система вывода. На этом этапе процесс состоит из объединения нечетких правил и сопоставления четких входов с интервальными нечеткими выходными множествами 2-го типа. Результатом работы механизма вывода является нечеткое множество 2-го типа.

Редукция типа и дефазификация. Этап редукции типа определяет основное отличие систем *Fuzzy-1* и *Fuzzy-2*. Чтобы найти окончательное четкое выходное значение, агрегированное нечеткое множество 2-го типа сначала сводится к интервальному нечеткому множеству 1-го типа, представляющему диапазон с нижним пределом y_l и верхним пределом y_r . Это

интервальное нечеткое множество типа 1 обычно называют центроидом нечеткого множества 2-го типа. Наиболее широко используется редукция типа «Центр множеств», разработанная Карником и Менделем [19].

На практике невозможно вычислить точные значения y_l и y_r . Для оценки этих значений используются итерационные методы редукции типов. Для данного агрегированного нечеткого множества 2-го типа приближительные значения y_l и y_r представляют собой центроиды соответствующих нечетких множеств 1-го типа. Математически эти центроиды находятся с помощью уравнений:

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^L x_i \mu^-(xi) + \sum_{i=L+1}^N x_i \mu_-(xi)}{\sum_{i=1}^L \mu^-(xi) + \sum_{i=L+1}^N \mu_-(xi)}; \quad (2)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^R x_i \mu_-(xi) + \sum_{i=R+1}^N x_i \mu^-(xi)}{\sum_{i=1}^R \mu_-(xi) + \sum_{i=R+1}^N \mu^-(xi)}, \quad (3)$$

где N – количество выборок, взятых по всему диапазону выходной переменной; x_i – выборка i -го выходного значения; μ^- и μ_- – верхняя и нижняя функции принадлежности; L и R – точки переключения, оцениваемые различными методами редукции типа.

Для регуляторов Мамдани и Сугено окончательное дефаззифицированное выходное значение y – это среднее значение двух центроидных значений из процесса редукции типа:

$$y = \frac{y_l + y_r}{2}. \quad (4)$$

III. Исследование и результаты

Для проведения исследований в среде программирования *MATLAB* была разработана модель низковольтной РЭС напряжением 0,4 кВ, 50 Гц, содержащей источники РГ на основе ВИЭ (ВЭУ и ФЭУ) и *D-STATCOM* (рис. 7). Моделировались изменение скорости ветра, вызывающего колебания напряжения в сети при работе ВЭУ, и влияние на сеть ФЭУ, искажающей синусоиду тока, характеризующееся суммарным коэффициентом гармонической составляющей по току THD_i , %.

На *MATLAB*-модели проведены исследования четырех сценариев реакции РЭС с РГ на ВИЭ на внешние возмущения, отличающихся подходами к регулированию параметров сети с помощью *D-STATCOM*: без регулирования; ПИ-регулирование; *Fuzzy-1*-регулирование; *Fuzzy-2*-регулирование. Внешними возмущениями были резкое изменение скорости ветра (5–4–5 м/с) и генерация в сеть высших гармоник при работе ФЭУ (рис. 8).

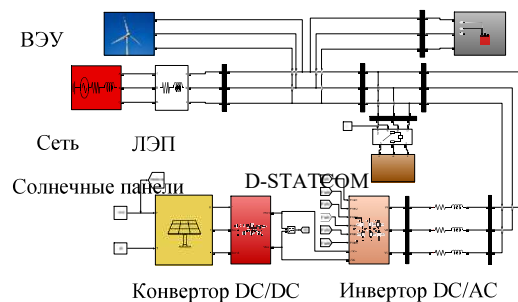


Рис. 7. MATLAB-Модель РЭС с РГ и D-STATCOM

Fig. 7. MATLAB-Model of the DEN with DG and D-STATCOM

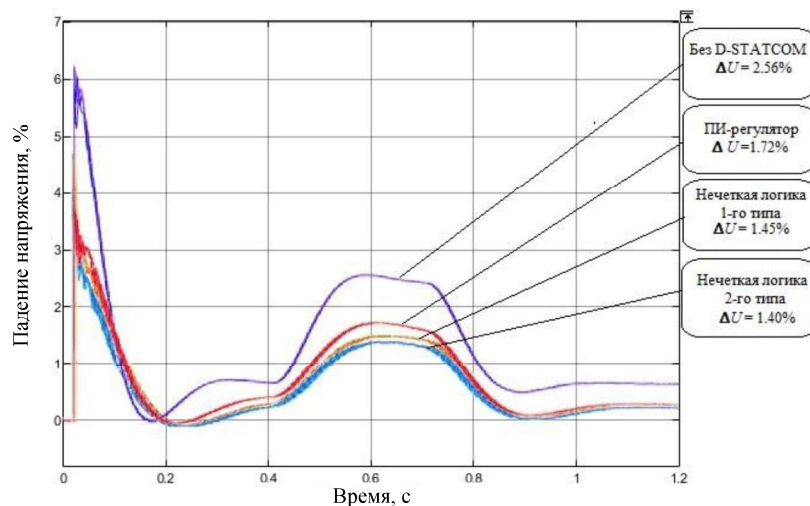


Рис. 8. Колебания напряжения:

(а) без D-STATCOM; (б) ПИ-регулирование;
 (в) Fuzzy-1-регулирование; (г) Fuzzy-2-регулирование

Fig. 8. Voltage fluctuation:

(a) without D-STATCOM; (б) PI regulation; (в) Fuzzy-1; (г) Fuzzy-2

На рис. 8 показано, что при уменьшении скорости ветра до 4 м/с размах колебаний напряжения составил 2,56 %. Использование Fuzzy-2-регулирования позволило снизить размах колебаний напряжения с 2,56 до 1,40 %. Из рис. 9 видно, что при работе ФЭУ вносит искажения с $THDi = 9,30\%$. Благодаря Fuzzy-2-регулированию тока D-STATCOM $THDi$ снижен до 3,08 %, в то время как в случае применения Fuzzy-1 $THDi$ составил 3,27 %.

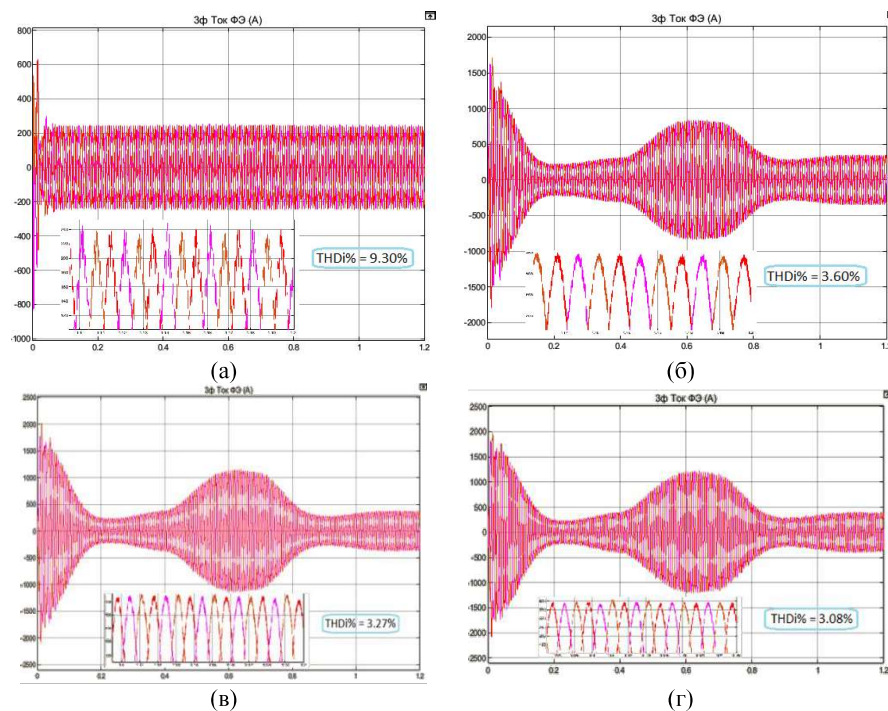


Рис. 9. THDi % при работе ФЭУ:
 (а) без D-STATCOM; (б) ПИ-регулирование;
 (в) Fuzzy-1-регулирование; (г) Fuzzy-2-регулирование

Fig.9. THDi % of the PV:
 (a) without D-STATCOM; (б) PI regulation;
 (в) Fuzzy-1 regulation; (г) Fuzzy-2 regulation

В табл. 2 приведены результаты сравнения показателей качества электроэнергии при моделировании нерегулируемой электрической сети, с D-STATCOM на основе ПИ-регулятора, с D-STATCOM на основе Fuzzy-1 и с D-STATCOM на основе Fuzzy-2.

Таблица 2.
 Сравнение результатов для разных режимов

Table 2.
 Comparison of results for different modes

Показатели качества электроэнергии	Без D-STATCOM	ПИ-регулятор	Нечеткая логика 1-го типа	Нечеткая логика 2-го типа
THDi, %	9,30	3,60	3,27	3,08
ΔU , %	2,56	1,72	1,45	1,40

IV. Выводы

Подключение источников РГ на ВИЭ (ФЭУ и ВЭУ) к РЭС приводит к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих по току $THDi$ %, генерируемых полупроводниковыми элементами инвертора ФЭУ, и колебаний напряжения, вызываемых при работе ВЭУ изменением скорости ветра.

Проблему высших гармоник и колебаний напряжения при подключении ВИЭ к РЭС позволяет решить *D-STATCOM*. *D-STATCOM* на традиционных ПИ-регуляторах в РЭС с ВИЭ работает медленно, поэтому предложено использовать регулятор на основе ИИ (нечеткой логики). Разработан алгоритм управления *D-STATCOM* на основе *Fuzzy-1* (Мамдани для регулирования напряжения и Сугено для регулирования тока). Алгоритм *Fuzzy-1* был доработан до *Fuzzy-2*, где каждая лингвистическая переменная имеет две функции принадлежности (верхнюю и нижнюю).

Результаты исследования различных подходов к регулированию параметров РЭС с помощью *D-STATCOM* показали преимущество алгоритма на основе нечеткой логики 2-го типа, позволяющего повысить эффективность регулирования напряжения и тока в РЭС при внешних возмущениях.

© Аккад А.Ф., 2025

© Соснина Е.Н., 2025

Поступила в редакцию 24.11.2025

Принята к публикации 07.12.2025

Received 24.11.2025

Accepted 07.12.2025

Библиографический список

- [1] Magadam P.K., Sakri S.G. Effects of non linear loading on power quality // 13th International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies, 2023. P. 1119-1123.
- [2] Matre M. Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques, 2020.
- [3] Karawia H., Mahmoud M., Sami M. Flicker in distribution networks due to photovoltaic systems // 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 12-15 June, 2017. P. 647-649. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0492
- [4] Bayu A. Power quality enhancement using DSTATCOM in industry plants // Power Electronics and Drives. 2020. Vol 5 (41). P. 157-175. DOI: 10.2478/pead-2020-0012
- [5] Madhusudan R. Control strategies for D-STATCOM – a comprehensive review // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. P. 2278-3075.
- [6] Sreekumar T., Jiji K.S. Comparison of proportional-integral (P-I) and integral-proportional (I-P) controllers for speed control in vector controlled induction motor drive, // 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems, Allahabad, India, 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508089.

- [7] Akkad A.F., Erdili N., Sosnina E. Application of a fuzzy logic controller in a D-STATCOM in an electrical network with distributed generation // *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russian Federation, 2023. P. 650-654. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110819
- [8] Akkad A.F., Sosnina E., Gusev D., Erdili N. Development of a D-STATCOM control based on fuzzy logic // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2024. P. 509-514. DOI: 10.1109/RusAuto-Con61949.2024.10694552.
- [9] Shi J., Noshadi A., Kalam A., Shi P. Fuzzy logic control of DSTATCOM for improving power quality and dynamic performance // *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, NSW, Australia, 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324796
- [10] Pandu S.B., Sundarabalan C.K., Srinath N.S., Krishnan T.S., Priya G.S., Balasundar C. Power quality enhancement in sensitive local distribution grid using interval type-II fuzzy logic controlled DSTATCOM // *IEEE Access*. 2021. Vol 9. P. 59888-59899. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3072865
- [11] Kadri A., Makhoulouf S. Interval type2 fuzzy logic based statcom controller for stabilizing a mixed electrical network system // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol 66(4). P. 391-405. DOI: 10.3311/PPee.19822
- [12] Srinivas D., Samyuktha P., Himabindu T., Shirisha K., Ashlesha S., Venkatesh E. Fuzzy logic controller-based DSTATCOM to improve power quality in distribution system // *Recent Advances in Power Systems. EPREC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, J. Kumar, S.N. Singh, O.P. Malik. Singapore: Springer. 2024. Vol. 1192. – P. 35-49. DOI: 10.1007/978-981-97-2788-9_3
- [13] Hagrass H. Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers // *Computational intelligence magazine*. 2007. Vol. 2. No. 1. P. 30-34. DOI: 10.1109/MCI.2007.357192
- [14] Handayani A.S., Husni N.L., Nurmaini S., Yani I. Application of type-1 and type-2 fuzzy logic controller for the real swarm robot // *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. 2019. Vol. 15(06). P. 83-98. DOI: 10.3991/ijoe.v15i06.10075
- [15] Reddy J.G.P., Reddy K.R. IRP control based LSCPWM-multilevel DSTATCOM for power quality improvement // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. Vol. 8. Is. 9S3. P. 353-358. DOI: 10.35940/ijitee.I3065.0789S319
- [16] Lata S., Ayyub M. Interval type-2 fuzzy logic system // *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 2014. Vol. 7. No. 3. P. 219-224.
- [17] Aguiar R.A., Franco I.C., Leonardi F. Comparative analysis of type-1 and type-2 fuzzy controllers: Exploiting synergies for improved control system performance // *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2023. Vol. 9. No. 4. DOI: 10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e
- [18] Mendel J.M. Type-2 fuzzy sets and systems: An overview // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2007. Vol. 2. No. 2. P. 20-29. DOI: 10.1109/MCI.2007.380672
- [19] Chen Y., Wang D. Studies on centroid type-reduction algorithms for interval type-2 fuzzy logic systems // *2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and*

Cloud Computing, Dalian, China, 2015. P. 344-349. DOI: 10.1109/BDCLOUD.2015.14.

References

- [1] P.K. Magadum, S.G. Sakri, "Effects of non linear loading on power quality", in proc. *13th International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies*, 2023, pp. 1119-1123.
- [2] M. Matre, *Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques*, 2020.
- [3] H. Karawia, M. Mahmoud and M. Sami, "Flicker in distribution networks due to photovoltaic systems", in proc. *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 12-15 June, 2017, pp. 647-649. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0492.
- [4] A. Bayu, "Power quality enhancement using dstatcom in industry plants", *Power Electronics and Drives*, vol. 5(1), pp. 157-175, 2020. DOI: 10.2478/pead-2020-0012.
- [5] R. Madhusudan, "Control strategies for D-STATCOM – a comprehensive review", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, pp. 2278-3075, 2019.
- [6] T. Sreekumar and K.S. Jiji, "Comparison of proportional-integral (P-I) and integral-proportional (I-P) controllers for speed control in vector controlled induction motor drive, 2012 2nd international conference on power", in proc. *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad, India, 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508089
- [7] A.F. Akkad, N. Erdili and E. Sosnina, "Application of a fuzzy logic controller in a D-STATCOM in an electrical network with distributed generation", in proc. *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 650-654. DOI: 10.1109/SmartIndustry-Con57312.2023.10110819.
- [8] A.F. Akkad, E. Sosnina, D. Gusev and N. Erdili, "Development of a D-STATCOM control based on fuzzy logic", in proc. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 509-514. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694552.
- [9] J. Shi, A. Noshadi, A. Kalam and P. Shi, "Fuzzy logic control of DSTATCOM for improving power quality and dynamic performance", in proc. *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, NSW, Australia, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324796.
- [10] S.B. Pandu, C.K. Sundarabalan, N.S. Srinath, T.S. Krishnan, G.S. Priya and C. Balasundar, "Power quality enhancement in sensitive local distribution grid using interval type-II fuzzy logic controlled DSTATCOM", *IEEE Access*, vol 9, pp. 59888-59899, April 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3072865
- [11] A. Kadri and S. Makhlof, "Interval type2 fuzzy logic based statcom controller for stabilizing a mixed electrical network system", *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 66(4), pp. 391-405, 2022. DOI: 10.3311/PPee.19822
- [12] D. Srinivas, P. Samyuktha, T. Himabindu, K. Shirisha, S. Ashlesha and E. Venkatesh, "Fuzzy logic controller-based DSTATCOM to improve power quality in distribution

- system”, in *Recent Advances in Power Systems. EPREC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, J. Kumar, S.N. Singh, O.P. Malik, Singapore: Springer, 2024, vol. 1192, pp. 35-49. DOI: 10.1007/978-981-97-2788-9_3
- [13] H. Hagrass, “Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers”, *Computational intelligence magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 30-34, Feb. 2007. DOI: 10.1109/MCI.2007.357192
- [14] A.S. Handayani, N.L. Husni, S. Nurmaini and I. Yani, “Application of type-1 and type-2 fuzzy logic controller for the real swarm robot”, *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, vol. 15(06), pp. 83–98, 2019. DOI: 10.3991/ijoe.v15i06.10075
- [15] J.G.P. Reddy and K.R. Reddy, “IRP control based LSCPWM-multilevel DSTAT-COM for power quality improvement”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, is. 9S3, pp. 353-358, July 2019. DOI: 10.35940/ijitee.I3065.0789S319
- [16] S. Lata and M. Ayyub, “Interval type-2 fuzzy logic system”, *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, vol. 7, no. 3. pp. 219-224, 2014.
- [17] R.A. Aguiar, I.C. Franco and F. Leonardi, “Comparative analysis of type-1 and type-2 fuzzy controllers: Exploiting synergies for improved control system performance”, *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, vol. 9, no. 4, July 2023. DOI: 10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e
- [18] J.M. Mendel, “Type-2 fuzzy sets and systems: An overview”, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 20-29, May 2007. DOI: 10.1109/MCI.2007.380672.
- [19] Y. Chen and D. Wang, “Studies on centroid type-reduction algorithms for interval type-2 fuzzy logic systems”, in proc. *2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing*, Dalian, China, 2015, pp. 344-349. DOI: 10.1109/BDCloud.2015.14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аккад Ахмад Фирас, ассистент Университета Алеппо, г. Алеппо, Сирийская Арабская Республика.

Ahmad Feras Akkad, teaching assistant of the Aleppo University, Aleppo, Syrian Arab Republic.

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Elena N. Sosnina, Dr. Sci. (Eng), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation