

## УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Применение теории нечетких множеств при решении задач энергетики является успешно развиваемой областью исследований последних лет [1]. В частности, исследования по управлению напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики были проведены в Японии [2, 3]. Их результаты являются естественным развитием применения методологии экспертных систем (например, [4]) к управлению напряжением и реактивной мощностью. Результаты [2, 3] демонстрируют, что нечеткая логика должна рассматриваться как одна из наиболее совершенных современных технологий для разработки сложных систем

управления. С ее помощью сложные требования могут быть реализованы в системах, базирующихся на знаниях с минимальным числом правил, что достигается на основе интерполятивного характера теории нечетких множеств [5].

Подход [2, 3] открывает важное направление в решении проблемы управления напряжением и реактивной мощностью. Однако его применение ограничено следующими содержательными и техническими соображениями:

- подход направлен на решение проблемы в упрощенной постановке без учета экономической составляющей (минимизация потерь) и ограничений по пропускной

способности элементов системы. Этот недостаток характерен для всех работ, связанных с использованием технологии знаний при управлении напряжением и реактивной мощностью;

- подход связан с построением индексов чувствительности (служащих для оценки эффективности управляющих воздействий и, как следствие, основой для формирования правил базы знаний), который имеет недостатки и ведет к существенным ошибкам;

- важный компонент нечеткого моделирования и управления – качество моделей и их настройка, способствующая повышению эффективности управления, что не нашло распространения;

- наличие дискретных величин управляющих воздействий регулирующих и компенсирующих устройств не позволяет использовать подход непосредственно.

Преодоление указанных моментов позволит использовать нечеткую логику для эффективного решения проблемы при ее полноценной постановке. Настоящая работа отражает результаты выполнения проекта, целью которого является повышение эффективности координированного управления напряжением и реактивной мощностью на основе разработки моделей, методов и системы управления реального времени (предназначенной для функционирования во взаимодействии с соответствующей АСДУ), базирующихся на интеграции традиционных численных методов и технологии нечеткой логики. Цель работы состоит в том, чтобы описать подход к построению разнообразных типов индексов чувствительности и формирование правил, обеспечивающих полноценные и гибкие решения, а также кратко обсудить вопросы построения и настройки нечеткой модели и рационального выполнения процедур нечеткой логики. Однако это – не единственная цель настоящей работы.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия, процесс реструктуризации электроэнергетической отрасли получил развитие во многих странах мира [6]. При этом необходимо отметить, что существенное внимание уделялось созданию рынков электроэнергии, а вопросам создания рынков вспомогательных услуг получили гораздо меньшее внимание. Рынки вспомогательных услуг обеспечивают поддержание надежного, бесперебойного и экономичного энергоснабжения, охватывая несколько функций [6], включая планирование и управление реактивной мощностью [7]. Принимая это во

внимание, другая цель настоящей работы состоит в том, чтобы обсудить пути использования нечеткой технологии в управлении напряжением и реактивной мощностью в условиях дерегулирования электроэнергетической отрасли. Математический аппарат для решения указанных целей приведен в [11, 12–17].

**1. Формирование индексов чувствительности.** Оценка влияния управляющего воздействия в узле  $j$  (с устройством для регулирования напряжения или компенсации реактивной мощности) на уровень напряжения в узле  $i$  связывается с использованием индекса

чувствительности по напряжению  $S_{ij}^V$ . В системе с  $I$  контролируемыми узлами и  $J$  узлами с регулируемыми или компенсируемыми устройствами, необходимо иметь матрицу

$[S_{ij}^V], i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$ . В [2, 3] построение матриц чувствительности основано на результатах [8], связанных с использованием системных матриц Якоби для этой цели (другие работы в этой области также основаны на этом подходе). Однако ограниченная точность линеаризации делает использование подхода применимым лишь при достаточно малых возмущениях (например, обсуждение в [3]).

Наш опыт показывает, что использование факторного планирования эксперимента (например, [9]) позволяет рациональным образом строить адекватные модели чувствительности. В частности, повышение адекватности в построении индексов (коэффициентов) чувствительности обеспечивается формированием “секущих”, а не “касательных” [10]. Использование аппарата факторного планирования эксперимента также позволяет: 1) исключить из рассмотрения узлы  $j$ , которые не имеют значимого влияния на уровень напряжения в узле  $i$  (это, в определенной мере, позволяет сводить централизованное управление к децентрализованному); 2) оценивать адекватность моделей чувствительности, и, если необходимо, изменять интервалы варьирования параметров для получения адекватных моделей.

Эффективность использования факторного планирования эксперимента для построения индексов (коэффициентов) чувствительности может быть проиллюстрирована примером подсистемы электроэнергетической системы Энергетической компании штата Парана, представленной на рисунке (узел 7 является балансирующим, и синхронный компенсатор

узла 2 отключен). Полное описание исходной информации (элементы системы и нагрузки) приведено в [10].

Для управления напряжением и реактивной мощностью могут быть использованы следующие средства: генераторы узлов 1, 8 и 9 и трансформаторы T1, T2 и T3 с регулируемым под нагрузкой ответвлениями. Таким образом, имеется 6 переменных управления, и достаточно использовать дробный факторный эксперимент  $2^{6-3}$  [9]: генераторы узлов 1, 8 и 9 соответствуют переменным  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  и трансформаторы T1, T2 и T3 соответствуют  $x_4 = x_1x_2$ ,  $x_5 = x_1x_3$  и  $x_6 = x_1x_2x_3$ .

Матрица  $[S_y^V]$  после статистического анализа приведена в табл. 1. Для сравнения –

табл. 2 содержит матрицу  $[S_y^V]$ , построенную на основе [8]. Результаты моделирования с использованием этих матриц показывают, что применение аппарата факторного планирования эксперимента позволяет уменьшить ошибку (относительную и взвешенную относительную) в оценке эффективности управляющих воздействий в значительной мере (в два и более раза) [10].

Полноценное решение проблемы основывается на использовании индексов чувствительности по мощности

$[S_{kj}^S], k=1, \dots, K, j=1, \dots, J$  (отражающих изменение мощности элемента  $k$  в силу управляющего воздействия узла  $j$ ) и индексов чувствительности по реактивной мощности

$[S_{kj}^Q], k=1, \dots, K, j=1, \dots, J$  (отражающих

изменение реактивной мощности элемента  $k$  в силу управляющего воздействия узла  $j$  и позволяющих оценивать приращения потерь [11]).

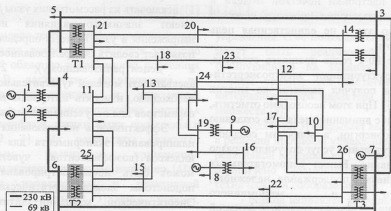
Таблица 1

Матрица  $[S_y^V]$ , построенная на основе факторного планирования эксперимента

Узел	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
3	0.052	0	0	0.032	-0.036	-0.047
4	0.431	0	0	0	0	0
5	0.128	0	0	0.138	0	-0.068
6	0.131	0	0	0	0.116	-0.072
10	0	0	0	-0.193	-0.232	-0.477
11	0.111	0	0	-0.418	-0.300	-0.268
12	0	0	0.089	-0.220	-0.232	-0.358
13	0.096	0	0.097	-0.234	-0.308	-0.337
14	0.086	0	0	-0.243	-0.188	-0.268
15	0.096	0	0	-0.234	-0.348	-0.328
16	0	0.368	0.455	0	0	0
17	0	0	0	-0.206	-0.236	-0.430
18	0.106	0	0	-0.372	-0.276	-0.277
19	0	0.183	0.582	0	0	-0.115
20	0.103	0	0	-0.413	-0.208	-0.256
21	0.111	0	0	-0.537	-0.220	-0.226
22	0	0	0	-0.211	-0.296	-0.469
23	0.099	0	0	-0.340	-0.248	-0.273
24	0	0	0.116	-0.220	-0.256	-0.332
25	0	0	0	-0.239	-0.400	-0.315
26	0	0	0	0	-0.228	-0.550

Управление напряжением и реактивной мощностью в условиях дерегулирования может также потребовать наличие индексов чувствительности по коэффициенту мощности

$[S_{pj}^{PF}], p=1, \dots, P, j=1, \dots, J$  (отражающих изменение коэффициента мощности элемента  $k$  в силу управляющего воздействия узла  $j$ ). Все типы



Подсистема электроэнергетической системы

индексов чувствительности могут быть получены на основе тех же вычислительных экспериментов, которые необходимы для построения индексов чувствительности по напряжению.

**2. Правила и лингвистические переменные.** Постановка проблемы управления напряжением и реактивной мощностью должна охватывать следующие уровни иерархии:

Таблица 2

Матрица  $[S_{ij}^V]$ , построенная на основе традиционного подхода

Узел	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
3	0.045	0.003	0.011	0.016	-0.016	-0.024
4	0.380	0.003	0.010	0.017	0.009	-0.024
5	0.113	0.005	0.017	0.070	-0.024	-0.038
6	0.115	0.005	0.016	-0.020	-0.059	-0.040
10	0.062	0.024	0.078	-0.095	-0.111	-0.252
11	0.094	0.020	0.063	-0.207	-0.146	-0.142
12	0.069	0.030	0.097	-0.110	-0.113	-0.188
13	0.076	0.033	0.106	-0.114	-0.150	-0.176
14	0.072	0.022	0.071	-0.123	-0.093	-0.140
15	0.081	0.028	0.089	-0.118	-0.172	-0.172
16	0.019	0.371	0.458	-0.029	-0.033	-0.048
17	0.064	0.027	0.086	-0.101	-0.111	-0.226
18	0.090	0.021	0.067	-0.190	-0.135	-0.145
19	0.024	0.183	0.585	-0.037	-0.042	-0.061
20	0.087	0.020	0.064	-0.206	-0.102	-0.132
21	0.098	0.017	0.056	-0.270	-0.106	-0.120
22	0.069	0.021	0.066	-0.099	-0.144	-0.244
23	0.085	0.022	0.069	-0.169	-0.123	-0.146
24	0.070	0.038	0.123	-0.109	-0.124	-0.180
25	0.086	0.021	0.068	-0.120	-0.197	-0.164
26	0.056	0.020	0.064	-0.083	-0.107	-0.287

♦ (А) – все ограничения соблюдаются, и необходимо минимизировать потери;

♦ (В) – ограничения по уровням напряжений узлов и/или пропускной способности элементов системы не соблюдаются, и соответствующие нарушения ограничений могут быть скорректированы;

♦ (С) – ограничения по уровням напряжений узлов и/или пропускной способности элементов системы не соблюдаются, и соответствующие нарушения ограничений не могут быть скорректированы.

Как было отмечено выше, подход [2, 3] обеспечивает корректирующее управление и основан на правилах следующего типа:

(I)	ЕСЛИ	напряжение узла находится вне допустимых пределов
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно обеспечить эффективную коррекцию напряжения узла
	И	регулирующее или компенсирующее устройство располагает достаточным регулировочным диапазоном для коррекции напряжения узла
ТО	увеличить (уменьшить) управляющее воздействие регулирующего или компенсирующего устройства	

Другие работы, относящиеся к использованию технологии знаний, также различают этапы корректирующего управления и минимизации потерь без рассмотрения последней цели в составе контура управления, основанного на знаниях. Однако наш опыт показывает, что более полноценные и гибкие решения могут быть получены, если база знаний включает следующий общий тип правил для уровня иерархии (В):

(II)	ЕСЛИ	напряжение узла находится вне допустимых пределов
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно обеспечить эффективную коррекцию напряжения узла
И	регулирующее или компенсирующее устройство располагает достаточным регулировочным диапазоном для коррекции напряжения узла	
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно снизить (повысить) потери
ТО	увеличить (уменьшить) управляющее воздействие регулирующего или компенсирующего устройства	

Подобным образом может быть представлено правило, например, ЕСЛИ нагрузка элемента системы превышает его пропускную способность. Следует отметить, что уровень иерархии (А) является частным по отношению к уровню (В). Уровень (С) также сводится к уровню (В), если вводится иерархия приоритетов, например, для узлов в случае минимизации степени несоблюдения ограничений. В общем случае, использование общих правил типа (II) обеспечивает решения отличные от решений, получаемых на основе правил типа (I). Наш опыт [12] показывает, что при использовании правил типа (II) возможно

снизить потери уже на этапе корректирующего управления.

Так как правила (I) и (II) отражают общие стратегии, каждое из них должно быть представлено набором правил, определяемых нечеткими значениями [5, 13] лингвистических переменных, которыми являются *эффективность управления*, *достаточный регулировочный диапазон* и *приращение потерь* как входные переменные и *интенсивность использования* как выходная переменная.

Вопросы оценки стоимости реактивной мощности являются предметом пристального внимания, важные результаты в этой области были получены в [14]. Они позволяют организовать управление реактивной мощностью в составе рынков вспомогательных услуг. Естественно, это требует включения лингвистической переменной *стоимость снабжения реактивной мощностью* в соответствующие правила. Однако необходимо отметить следующее.

Подход, обоснованный в [15], связывается с целесообразностью организации рынков вспомогательных услуг на подготовительной и действующей основе. При структурировании рынков вспомогательных услуг таким образом, система управления может служить как система поддержки принятия решений для подготовительных операций. Система управления, для действующих электроэнергетических систем, должна включать функцию соблюдения ограничений по уровням реактивной мощности или уровням коэффициента мощности. Эти ограничения могут учитываться традиционным образом как ограничения по уровням напряжения с использованием

$$[S_{kj}^Q], p = 1, \dots, P, j = 1, \dots, J$$

или

$$[S_{pj}^{PF}], p = 1, \dots, P, j = 1, \dots, J.$$

Однако есть другой путь.

Ограничения по уровням напряжений узлов и пропускной способности элементов системы определяются техническими требованиями и должны соблюдаться обязательно. Ограничения по уровням реактивной мощности или уровням коэффициента мощности связаны с экономическими соображениями и поэтому имеют желательный характер. Это позволяет реализовать учет ограничений, например, по уровням реактивной мощности на основе [16] минимизации функции

$$D = \frac{\sum_{p=1}^P \varrho_p^0 | \varrho_p - \varrho_p^0 |}{\sum_{p=1}^P \varrho_p^0}, \quad (1)$$

или функции

$$D = \left[ \frac{\sum_{p=1}^P \varrho_p^0 (\varrho_p - \varrho_p^0)^2}{\sum_{p=1}^P \varrho_p^0} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

которые отражают взвешенные средние величины отклонений реактивной мощности (ВСВОРМ) от их желательных уровней  $\varrho_p^0, p = 1, \dots, P$ .

На основе (1) или (2), можно реализовать функцию соблюдения ограничений по желательным уровням реактивной мощности с использованием индексов (коэффициентов) чувствительности  $[S_j^D], j = 1, \dots, J$  таким же образом, как функцию минимизации потерь. Например, правило типа (II) может быть модифицировано следующим образом:

(III)	ЕСЛИ	напряжение узла находится вне допустимых пределов
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно обеспечить эффективную коррекцию напряжения узла
	И	регулирующее или компенсирующее устройство располагает достаточным регулировочным диапазоном для коррекции напряжения узла
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно снизить (повысить) ВСВОРМ
	И	регулирующее или компенсирующее устройство способно снизить (повысить) потери
ТО	увеличить (уменьшить) управляющее воздействие регулирующего или компенсирующего устройства	

Реализация правила типа (III) предполагает наличие лингвистической переменной *приращение ВСВОРМ*.

Не останавливаясь на вопросах разработки лингвистического описания, охватывающих [5, 13] формирование интервалов определения универсальных множеств для лингвистических

переменных, выбор их нечетких значений и функций принадлежности для этих нечетких значений (эти вопросы освещены в [17]), укажем на следующее.

В большинстве случаев нечеткие системы оперируют с функциями принадлежности, которые являются треугольными или трапециoidalными [5, 18]. В настоящем проекте они также применяются: трапециoidalные функции принадлежности используются как крайние, а треугольные функции – как промежуточные. Для настройки нечеткой модели с позиций ее адекватности и сложности [19, 20] был использован следующий подход.

Как показано в работах [17, 21], существует глубокая связь между множеством правил, включенных в базу знаний, и моделями многокритериальной оптимизации. Это обстоятельство сделало возможным получить многокритериальные решения (на основе результатов [22, 23]) для типовых ситуаций применительно к различным уровням иерархии управления. Эти решения служили основой для настройки нечеткой модели (чтобы оценить приемлемое число нечетких значений для лингвистических переменных, уровни перекрытия их функций принадлежности и т.д.). В частности, было показано, что увеличение числа нечетких значений с 5 до 7 практически не изменяет результаты нечеткого вывода и дефuzziфикации [5, 13] (точной интерпретации [24]). Принимая это во внимание, в качестве нечетких значений для лингвистических переменных *эффективность управления, достаточный регулировочный диапазон и интенсивность использования* могут служить *НИЗКИЙ, МЕНЕЕ ЧЕМ СРЕДНИЙ, СРЕДНИЙ, БОЛЕЕ ЧЕМ СРЕДНИЙ* и *ВЫСОКИЙ*. Нечеткими значениями для переменных *приращение потерь и приращение ВСВОРМ* могут служить *Большой Отрицательный, Малый Отрицательный, Нулевой, Малый Положительный* и *Большой Положительный*.

При выполнении операций нечеткой логики используются так называемые многомерные алгоритмы нечеткого вывода [17, 19, 24], принимаю во внимание их вычислительную эффективность (соответствующие сравнительные оценки приведены в [19, 20]), а также ряд их свойств, и процедуру дефuzziфикации центра области [5, 13] (полной интерпретации [24]). Однако результаты дефuzziфикации не рассматриваются как окончательные, поскольку должны быть модифицированы в соответствии с дискретными величинами управляющих воздействий

соответствующих регулирующих и компенсирующих устройств. Решение этого вопроса связывается с дискретными методами оптимизации, обсуждаемыми в [25, 26].

**3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.** Процедуры нечеткой логики реализованы (на основе языка программирования C++) в составе системы управления, предназначенной для функционирования во взаимодействии с соответствующей АСДУ.

Система управления позволяет использовать разнообразные лингвистические описания для отражения правил базы знаний. Ее гибкость обеспечивает возможность включения различных типов правил, связанных со специфическими условиями (например, соблюдение принципа минимального отклонения), а также условиями, определяемыми операционной философией конкретной электроэнергетической системы (например, приемлемое число коммутаций регулирующих и компенсирующих устройств).

Система поддерживает функции базы данных, которая включает условно постоянную информацию (параметры элементов электроэнергетической системы) и данные, обновляемые АСДУ (топология системы, параметры текущего состояния, ограничения по уровням напряжений узлов и пропускной способности элементов системы, располагаемые диапазоны регулирования оборудования и т.д.).

Использование системы обеспечивает достижение традиционных целей (соблюдение ограничений по уровням напряжений узлов и пропускной способности элементов системы, снижение потерь мощности и энергии), а также следующих целей: эффективное использование регулирующего и компенсирующего оборудования; рациональный учет, непосредственно в процессе управления, факторов и ограничений, основанных на опыте, интуиции и знаниях диспетчерского персонала, которые существенно влияют на обоснованность вырабатываемых управляющих воздействий; уменьшение интенсивной психологической нагрузки и неквалифицированной работы диспетчерского персонала, ее интеллектуализацию.

#### Выводы

1. Использование системы управления, основанной на процедурах нечеткой логики, обеспечивает достижение традиционных целей (соблюдение ограничений по уровням напряжений узлов и пропускной способности

элементов системы, снижение потерь мощности и энергии), а также следующих целей: эффективное использование регулирующего и компенсирующего оборудования; рациональный учет, непосредственно в процессе управления, факторов и ограничений, основанных на опыте, интуиции и знаниях диспетчерского персонала, которые существенно влияют на обоснованность выработываемых управляющих воздействий; уменьшение интенсивной психологической нагрузки и некавалифицированной работы диспетчерского персонала, ее интеллектуализация.

2. В работе описан подход к построению разнообразных типов индексов чувствительности и формированию правил, обеспечивающих более полноценные и гибкие решения при исследовании задачи управления напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики. Формирование индексов чувствительности должно основываться на использовании факторного планирования эксперимента, что позволяет рациональным образом строить адекватные модели чувствительности.
3. Использование общих правил типа (II) позволяет снизить потери уже на этапе корректирующего управления.

### Литература

1. П.Я. Екель, Теорія нечітких множин у задачах проектування, планування та керування складних систем (на прикладі задач електроенергетики), Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", 2000, т. 1, сс. 16-23.
2. T. Namura, Y. Nakanishi, K. Yasuda, and R. Yokogama, Multi-attribute voltage-reactive power control based on approximate reasoning, in Proceedings of the 3-rd Symposium on Expert System Applications to Power Systems. Tokyo-Kobe, 1991, pp. 462-469.
3. R. Yokoyama, T. Nimura, and Y. Nakanishi, A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning, IEEE Transactions. Power Systems, vol. 8, no. 2, 1993, pp. 636-645.
4. C.C. Liu and K. Tomsovic, An expert system assisting decision making on reactive power/voltage control, IEEE Transactions. Power Systems, vol. 1, no. 3, 1986, pp. 195-201.
5. L.H. Tsoukalas and R.E. Uhrig, Fuzzy and

- Neural Approaches in Engineering. New York, Wiley, 1997.
6. M. Huneault, F.D. Galiana, and G. Gross, A review of restructuring in the electricity business, in Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference. Trondheim, vol. 1, 1999, pp. 19-31.
7. C. Hsu and M.-S. Chen, Reactive power planning and operating in the deregulated power utilities, in Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London, 2000, pp. 72-77.
8. I. Hano, Y. Tamura, S. Narita, and K. Matsumoto, Real time control of system voltage and reactive power, IEEE Transactions. Power Systems, vol. 88, no. 10, 1969, pp. 1344-1359.
9. В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко, Планирование эксперимента в технике. Киев, Техніка, 1984.
10. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, M.F.D. Junges, F.J.A. Oliveira, R. Kowaltschuk, L. Mikami, J.R.P. Silva, and T.Y. Taguti, An approach to constructing sensitivity indices and fuzzy control of system voltage and reactive power, in Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans, vol. 2, 1999, pp. 759-764.
11. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, M.F.D. Junges, F.J.A. Oliveira, R. Kowaltschuk, and T.Y. Taguti, Fuzzy logic in voltage and reactive power control in power systems, in Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications. Hawaii, 1999, pp. 622-627.
12. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, M.F.D. Junges, A.V. Prakhovnik, F.J.A. Oliveira, A. Melek, R. Kowaltschuk, and T.Y. Taguti, Fuzzy logic technology in reactive power control, in Proceedings of the IEEE and IEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London, 2000, pp. 518-523.
13. H.-J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications. Boston, Kluwer, 1990.
14. S. Hao and A. Papalexopoulos, Reactive power pricing and management, IEEE Transactions. Power Systems, vol. 12, no. 1, 1997, pp. 95-104.
15. R.J. Kaye, M.A.B. Zammit, and D.J. Hill, Coordinated spot and ancillary service market to optimise power system security, in Proceedings of the International Symposium on Bulk Power Systems Dynamics and Control IV: Restructuring. Santorini, 1998, pp. 539-544.
16. P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, F.J.A. Oliveira, A. Melek, T.Yu. Taguti, and Z.A. Styczynski, Fuzzy logic based approach to voltage and reactive

- power control in regulated and deregulated environments, in Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. Budapest, 2001, pp. 399-404.
17. P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, J.L.T. Morra, and F.P.G. Paletta, Fuzzy logic based approach to voltage and reactive power control in power systems, *International Journal of Computer Research*, vol. 11, no. 2, 2002, pp. 159-170.
  18. A. Kandel and G. Lanholz (ed.), *Fuzzy Control Systems*. Boca Raton, CRC Press, 1993.
  19. П.Я. Экель, В.А. Попов, В.В. Ткаченко, Нечеткий вывод в задачах управления функционированием и развитием систем электроснабжения, *Техническая электродинамика*, № 6, 1991, сс. 77-83.
  20. P. Ekel and V. Popov, Fuzzy set theory and problems of the design and control of power systems and subsystems, in Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications. Albany, 1995, pp. 46-51.
  21. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, F.P.G. Paletta, and Z.A. Styczynski, Fuzzy technology in design, planning, and control of complex systems (on the example of power engineering problems), in *Electrical and Computer Engineering Series: Signal Processing, Communications and Computer Science*. New York: WSES Press, 2000, pp. 333-338.
  22. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, and M.F.D. Junges, Methods of multicriteria decision making in fuzzy environment and their applications to power system problems, in Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference. Trondheim, vol. 2, 1999, pp. 755-761.
  23. P.Ya. Ekel, Methods of decision making in fuzzy environment and their applications, *Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications* (invited 45 min lecture, Third World Congress of Nonlinear Analysts. Catania, July 19-26, 2000), vol. 47, no. 5, 2001, pp. 979-990.
  24. А.В. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов, Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Москва, Наука, 1986.
  25. А.В. Праховник, П.Я. Экель, А.Ф. Бондаренко, Моделі та методи оптимізації і керування режимами систем Електропостачання. Київ, ІСДО, 1994.
  26. P.Ya. Ekel, Approach to decision making in fuzzy environment, *International Journal of Computers and Mathematics with Applications*, vol. 37, no. 4/5, 1999, pp. 59-71.