Купова А. В., Соловьев В. А., Светлаков А. А., Челухин В. А.
A. V. Kupova, V. A. Solovyev, A. A. Svetlakov, V. A. Chelukhin

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

VOLTAGE STABILIZATION BY A STATIC VAR COMPENSATOR WITH A FUZZY CONTROLLER IN A SYSTEM WITH A VARIABLE LOAD

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.
Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.
Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Engineering, Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Светлаков Анатолий Антонович – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, Томск). E-mail: office@kcup.tusur.ru.
Anatolii A. Svetlakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, Tomsk). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

Челухин Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.
Mr. VladimirA. Chelukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Аннотация. Электроприёмники, характеризующиеся как переменная нагрузка, оказывают негативное влияние на питающие сети. Изменения нагрузки вызывают значительные колебания напряжения, которые воздействуют на других потребителей электроэнергии. Для стабилизации напряжения в электрических сетях используют статические тиристорные компенсаторы. В статье приводятся результаты исследований режимов работы электроприёмников с переменной нагрузкой, к которым относятся дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы. Рассматривается влияние режимов работы на алгоритмы нечёткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором. Применение нечётких алгоритмов управления позволяет получить более высокие значения быстродействия и точности регулирования.

Summary. Electric receivers, characterized as a variable load, have a negative impact on the supply networks. Load changes cause significant voltage fluctuations that affect other electricity consumers. Static VAR compensators are used to stabilize the voltage in electrical grids. The article presents the results of studies of the operating modes of electric receivers with variable load, which include arc steel furnaces and rolling mills. The influence of operating modes on the algorithms of a fuzzy detector in the control system of a static thyristor compensator is considered. The use of fuzzy control algorithms allows us to obtain higher values of speed and accuracy of regulation.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, стабилизация напряжения, нечёткая логика.

Key word: static var compensator, voltage stabilization, fuzzy logic.

УДК 004.896

На качество электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий большое влияние оказывает характер нагрузки подсоединённых электроприёмников. Переменные и резкопеременные нагрузки приводят к отклонениям и колебаниям напряжения, несимметрии и несинусоидальности. В результате может наблюдаться увеличение потерь электроэнергии в сетях и электротехническом оборудовании, снижение срока службы и производительности оборудования. Наиболее сложные режимы энергопотребления наблюдаются у прокатных станов и дуговых сталеплавильных печей. Так как эти электроприёмники работают на больших мощностях, то проблема регулирования качества электроэнергии в точках их подключения является очень важной [1].

Для снижения негативного влияния на питающие сети искажающего электроприёмника зачастую используют статические тиристорные компенсаторы (СТК) [2; 3]. В целом наблюдается положительный опыт их применения в системах энергоснабжения промышленных предприятий, однако при помощи СТК не всегда удаётся достичь результатов, удовлетворяющих требованиям действующих стандартов. Так, например, на рис. 1 показаны характерные для металлургического завода графики отклонения напряжения ΔU и дозы фликера *Pst* при работающей дуговой сталеплавильной печи. При этом для обоих показателей наблюдается превышение допустимых значений. В норме отклонение напряжения не должно превышать 10 %, доза фликера – 1,38 о.е.

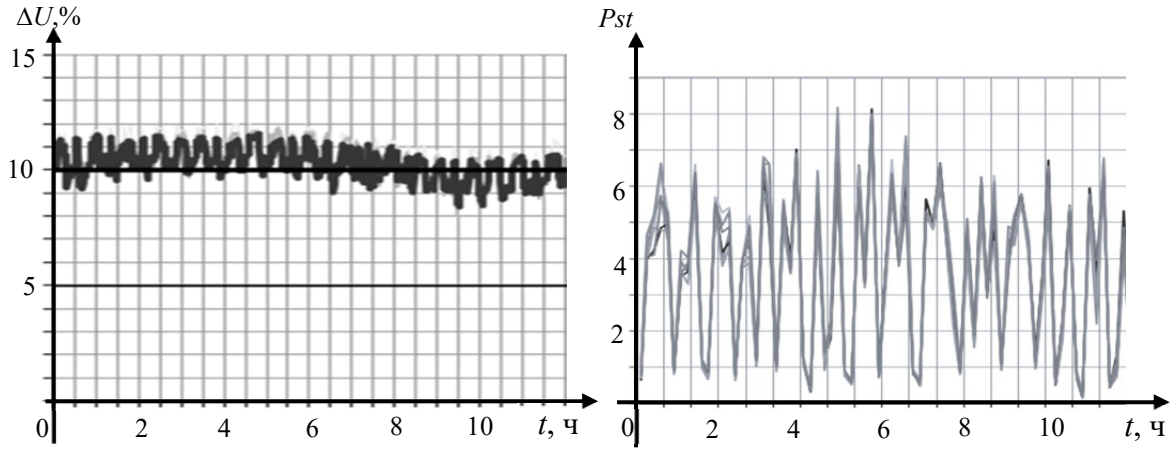

Рис. 1. Отклонение напряжения и доза фликера при работающей дуговой печи

Повышение эффективности работы СТК возможно за счёт применения более совершенных алгоритмов управления устройством. Формирование этих алгоритмов возможно только при детальном изучении процессов, протекающих в системе энергоснабжения, но такие исследования на реальном объекте приведут к существенным финансовым затратам. Поэтому в системе MatLab была разработана модель, показанная на рис. 2.

В качестве электроприёмника с переменной нагрузкой была выбрана дуговая сталеплавильная печь, т.к. в период расплава металла в ней наблюдаются наиболее сильные изменения в нагрузке, связанные с неустойчивым горением электрических дуг. Во время плавки в дуговой печи протекают различные физико-химические процессы, связанные с горением электрической дуги, химическими реакциями, распределением температур в ванне печи и т.п. Но так как все эти процессы являются взаимосвязанными, их влияние на питающие электрические сети может быть описано как изменение активной и реактивной мощностей. Поэтому в модели дуговая печь представлена как последовательное соединение переменных активно-индуктивных элементов [4]. Электроснабжение печи осуществляется через печной трансформатор, вторичные обмотки которого переключаются для регулирования мощности, вводимой в печь. Устойчивое горение электрических

дуг возможно только при достаточно низком значении коэффициента мощности, поэтому в систему включён дополнительный реактор, который тоже имеет несколько ступеней переключения.

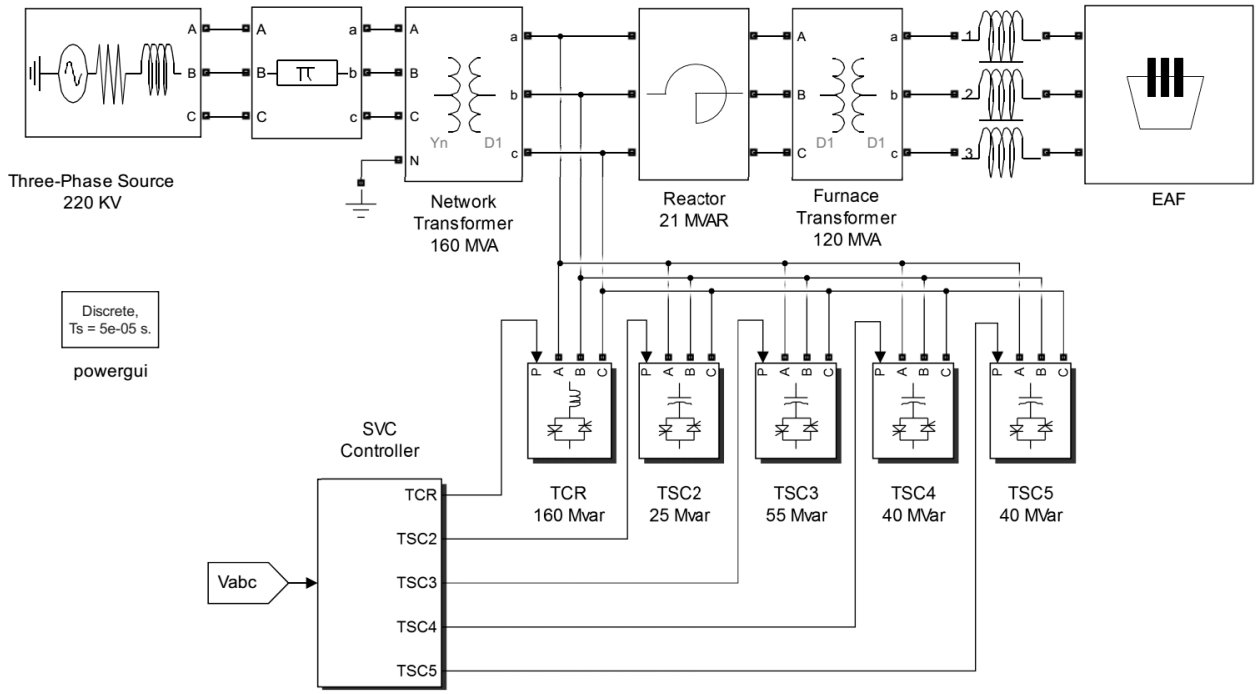

Рис. 2. Модель системы энергоснабжения с СТК в MatLab

СТК состоит из управляемого тиристорами реактора (TCR) и четырёх ступенчато коммутируемых ёмкостных фильтров (TSC). В рассматриваемой модели СТК построен на основе примера, приведённого в [5], при этом учитываются особенности исследуемой системы [6].

Как правило, для управления СТК используются регуляторы, реализующие ПИ-закон управления. В качестве сигнала управления СТК можно использовать уровень реактивной мощности или уровень напряжения. Кажется очевидным, что если в процессе работы дуговой печи наблюдаются значительные колебания реактивной мощности, зачастую превышающие колебания активной, то желательно осуществлять регулирование по её уровню. Однако в работах [7–9] показано, что в таком случае невозможно обеспечить необходимый уровень напряжения в точке подключения дуговой печи, а это влияет на её производительность и является нежелательным. Функциональная схема системы управления СТК по уровню напряжения показана на рис. 3.

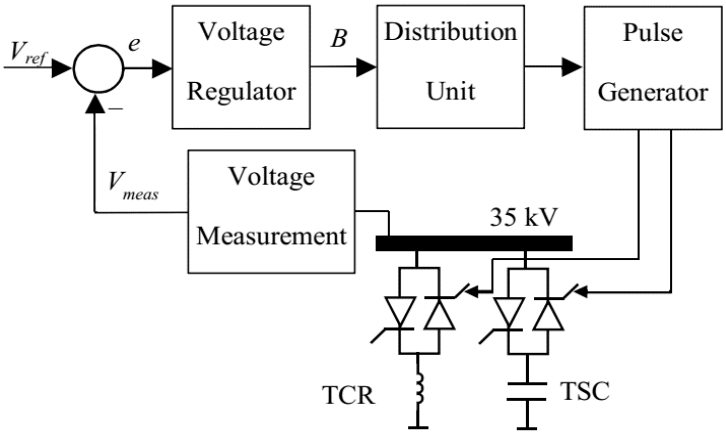

Рис. 3. Функциональная схема системы управления СТК

Входным сигналом регулятора является сигнал рассогласования *e* заданного V_{ref} и измеренного V_{meas} напряжений в точке подключения компенсатора. В процессе работы регулятора формируется сигнал проводимости *B*, на основании которого в блоке *Distribution Unit* происходит выбор группы элементов TSC и TCR, на которые будут подаваться управляющие импульсы для тиристоров. Затем эти импульсы вырабатываются в блоке *Pulse Generator*.

В рассматриваемой системе включено большое количество нелинейных элементов, что делает проблемным определение параметров регулятора аналитическими методами. Поэтому для получения значений пропорционального *Kp* и интегрального *Ki* коэффициентов был использован блок *Signal Constraint*, предназначенный для подбора оптимальных параметров регулятора численными методами [10].

На значения коэффициентов *Kp* и *Ki* оказывают сильное влияние режимы работы дуговой сталеплавильной печи. Эти режимы могут быть управляемыми, например при переключении обмоток печного трансформатора и реактора, и неуправляемыми из-за процессов внутри печи. В модели неуправляемые режимы имитируются при помощи изменения параметров *R* и X_L, которые характеризуют изменение потребляемых печью активной и реактивной мощностей. В качестве примера такого влияния в табл. 1 приводятся значения *Kp* и *Ki* для максимального по мощности режима печи, полученные при одинаковых начальных условиях и допустимом отклонении регулируемого сигнала не более 2 %. По приведённым результатам видно, что даже незначительное изменение нагрузки может привести к существенному изменению оптимальных параметров регулятора.

Таблица 1

Параметры ПИ-регулятора

X_L = 5 мОм									
R, мОм	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8
Kp	14,85	26,34	1,00	22,04	14,91	17,32	14,42	4,00	4,00
Ki	14,75	7,83	232,30	21,76	2,98	3,21	1,51	1,00	1,41
X_L = 9 мОм									
R, мОм	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8
Kp	15,73	15,10	14,30	15,98	16,88	13,71	5,30	4,00	4,00
Ki	1,72	39,29	8,40	4,63	1,67	2,16	1,01	0,99	3,46

Следует отметить, что выбор оптимальных параметров регулятора неоднозначен и зависит не только от выбора начальных условий, но и от допустимых отклонений регулируемого сигнала от заданного уровня. На рис. 4 приводится пример сравнения переходных процессов напряжения и коэффициента мощности в точке подключения СТК при выборе коэффициентов регулятора. Рассматривался один возможный режим работы печи, поэтому все параметры в системе были одинаковы, отличались лишь уровни допустимого отклонения напряжения. На рис. 4, *а* показаны переходные процессы с коэффициентами *Kp* = 11,64 и *Ki* = 39,75, полученными при допустимом отклонении 1 %, на рис. 4, *б* – переходные процессы с коэффициентами *Kp* = 4 и *Ki* = 1,91, полученными при допустимом отклонении 3 %.

В первом случае сигналы напряжения и коэффициента мощности достигают заданного значения с минимальным отклонением от заданного значения, однако наблюдается некоторая колебательность сигналов. С учётом того, что изменение параметров системы может происходить с частотой 1…12 Гц [1, 21], очевидно, что такие колебания значений не являются положительным признаком. Увеличение допустимых отклонений позволяет получить новые коэффициенты регулятора и добиться снижения колебательности сигнала напряжения, но при этом ухудшаются показатели коэффициента мощности.

Наиболее сложными при определении коэффициентов *Kp* и *Ki* являются режимы печи с максимальными значениями потребляемых мощностей. В некоторых случаях практически невозможно подобрать коэффициенты регулятора, которые позволили бы скомпенсировать реактивную

мощность в системе. Поэтому работу ПИ-регулятора в системе управления СТК для компенсации переменных нагрузок нельзя считать удовлетворительной. В качестве аналога можно рассмотреть работу системы управления на основе нечёткой логики. Применение нечётких регуляторов в системе управления СТК описано в работах [11–14]. Однако в этих работах рассмотрено применение СТК в системах передачи электроэнергии на дальние расстояния, соответственно, их функции отличаются от функций компенсатора в системе с переменной нагрузкой.

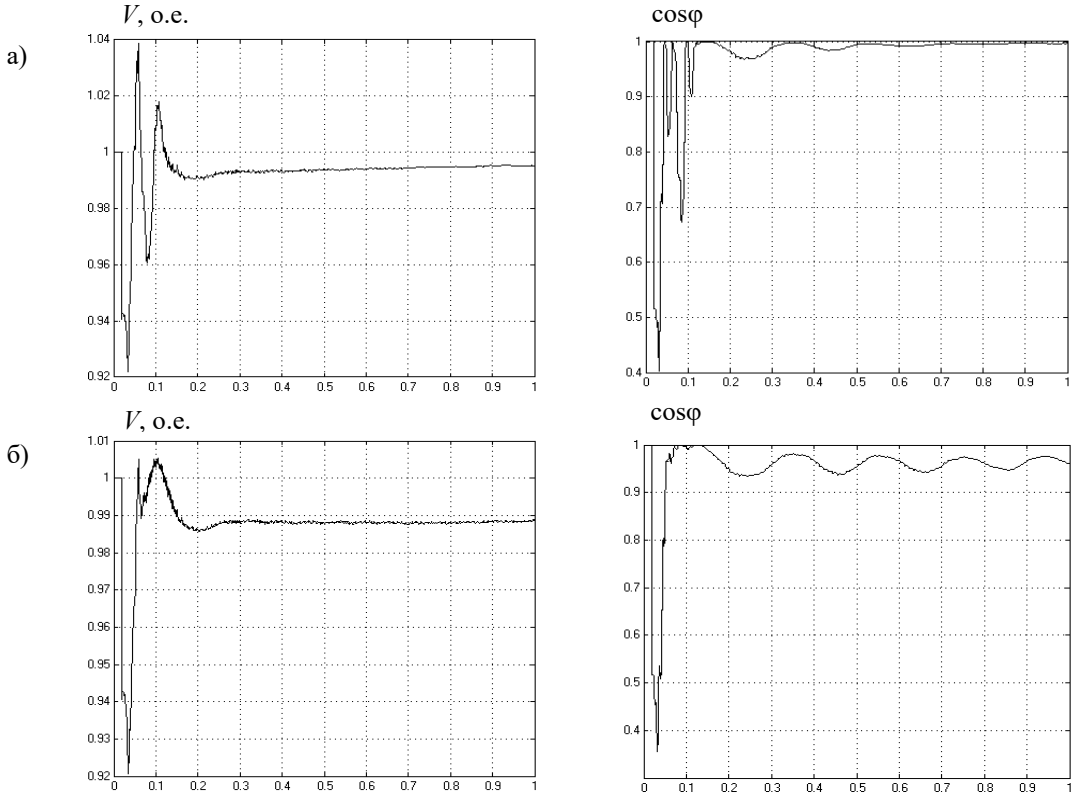

Рис. 4. Переходные процессы напряжения и коэффициента:
а – 1 % отклонения, б – 3 % отклонения

Перед включением нечёткого регулятора в систему управления СТК следует определиться с входными и выходными лингвистическими переменными регулятора. Нечёткий регулятор позволяет использовать несколько входных (выходных) сигналов, но их количество не должно быть неоправданно большим, т.к. это увеличивает время отработки сигналов и, соответственно, снижает быстродействие регулятора. Для рассматриваемой системы важным является поддержание уровня напряжения в точке подключения, поэтому так же, как и для ПИ-регулятора, в качестве входного сигнала должен быть учтён сигнал рассогласования *e*. Использование производной *de*/*dt* позволит оценить скорость изменения напряжения и использовать это для определения выходной переменной *B*. Кроме того, следует учесть, что достижение заданного уровня напряжения осуществляется при включении определённых фильтров TSC, которые соответствуют значению *B* (см. рис. 3). Для того чтобы избежать бесконечного переключения фильтров в результате работы регулятора, он должен предусматривать, какой именно фильтр TSC включён в данный момент времени. Поэтому нечёткий регулятор дополняется входной переменной *Step TSC*. Схема включения нечёткого регулятора в систему управления СТК показана на рис. 5.

Области определения входных и выходной переменных были определены в результате проведения исследований на имитационной модели системы электроснабжения с переменной нагрузкой. По результатам настройки нечёткого регулятора были сформированы функции принадлежности этих переменных (см. рис. 6) и определены правила формирования выходной переменной (см. табл. 2).

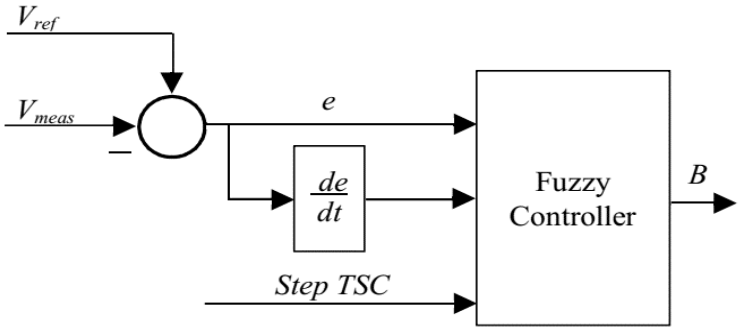

Рис. 5. Схема включения нечёткого регулятора

Переменная *e* имеет пять термов: *N* – перерегулирование; *Z* – положение около заданного значения; *PS* – малое отклонение от заданного значения; *PM* – среднее отклонение; *PB* – большое отклонение. Переменная *de*/*dt* содержит следующие термы: *N* – рассогласование быстро уменьшается; *P* – рассогласование быстро увеличивается; *Z* – рассогласование не изменяется или изменяется незначительно. Термы переменной *Step TSC* определяются количеством включённых фильтров: *Step*0 – все TSC выключены; *Step*1 – включён TSC2; *Step*2 – включены TSC2 и TSC3; *Step*3 – включены TSC2, TSC3 и TSC4; *Step*4 – включены все TSC.

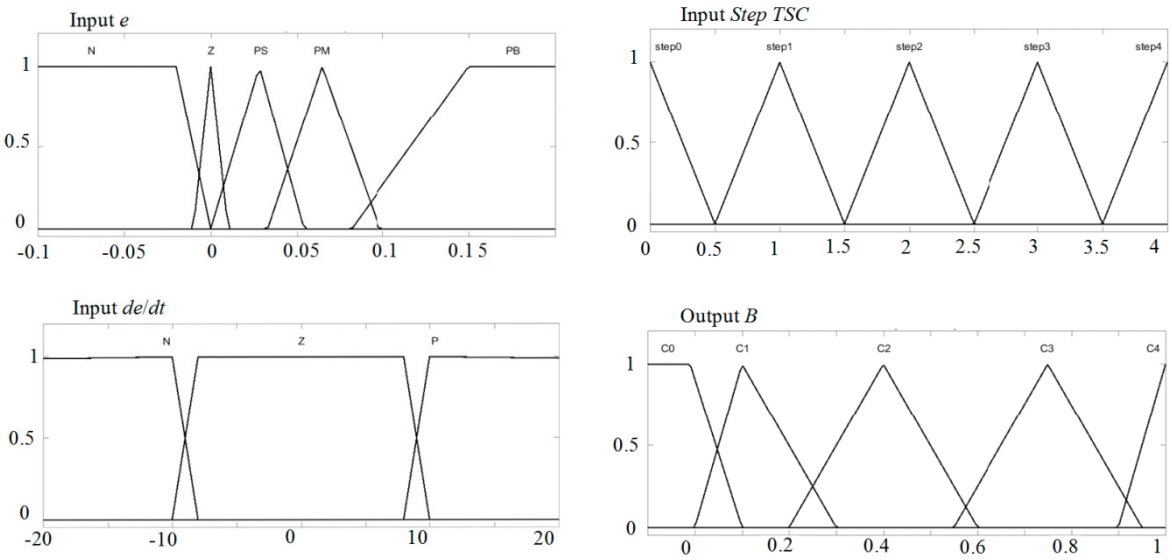

Рис. 6. Функции принадлежности входных и выходной переменных

Выходная лингвистическая переменная *B* изменяется в относительных единицах от 0 до 1. Значение «0» соответствует отключённому СТК, «1» – работающему на максимальной мощности. Функции принадлежностей соответствуют значениям ёмкостной проводимости, которую вносят соответствующие элементы TSC.

Результаты работы нечёткого регулятора по стабилизации напряжения можно увидеть на рис. 7. Включение нагрузки приводит к понижению уровня напряжения до значения 0,885 о.е. При помощи нечёткого регулятора можно получить напряжение близкое по значению к заданному (перерегулирования менее 0,5 %), тогда как в системе с ПИ-регулятором только около 0,97 о.е. Также при помощи нечёткого регулятора хорошо компенсируется реактивная мощность. Выбранная нагрузка в точке подключения СТК снижает cosφ до значения 0,4. СТК с ПИ-регулятором в системе управления позволяет поднять коэффициент мощности до 0,9, с нечётким регулятором – до 1.

Таблица 2

База правил нечёткого регулятора

de/dt	***e***	**TSC**				
		Step0	**Step1**	**Step2**	**Step3**	**Step4**
Z	*N*	C0	C0	C1	C2	C3
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C2	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C4	C4	C4	C4	C4
P	*N*	C0	C1	C2	C3	C4
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C1	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C2	C3	C4	C4	C4
N	*N*	C0	C0	C0	C1	C2
	Z	C0	C0	C1	C2	C3
	PS	C0	C0	C1	C2	C3
	PM	C0	C1	C2	C3	C4
	PB	C0	C1	C2	C3	C4

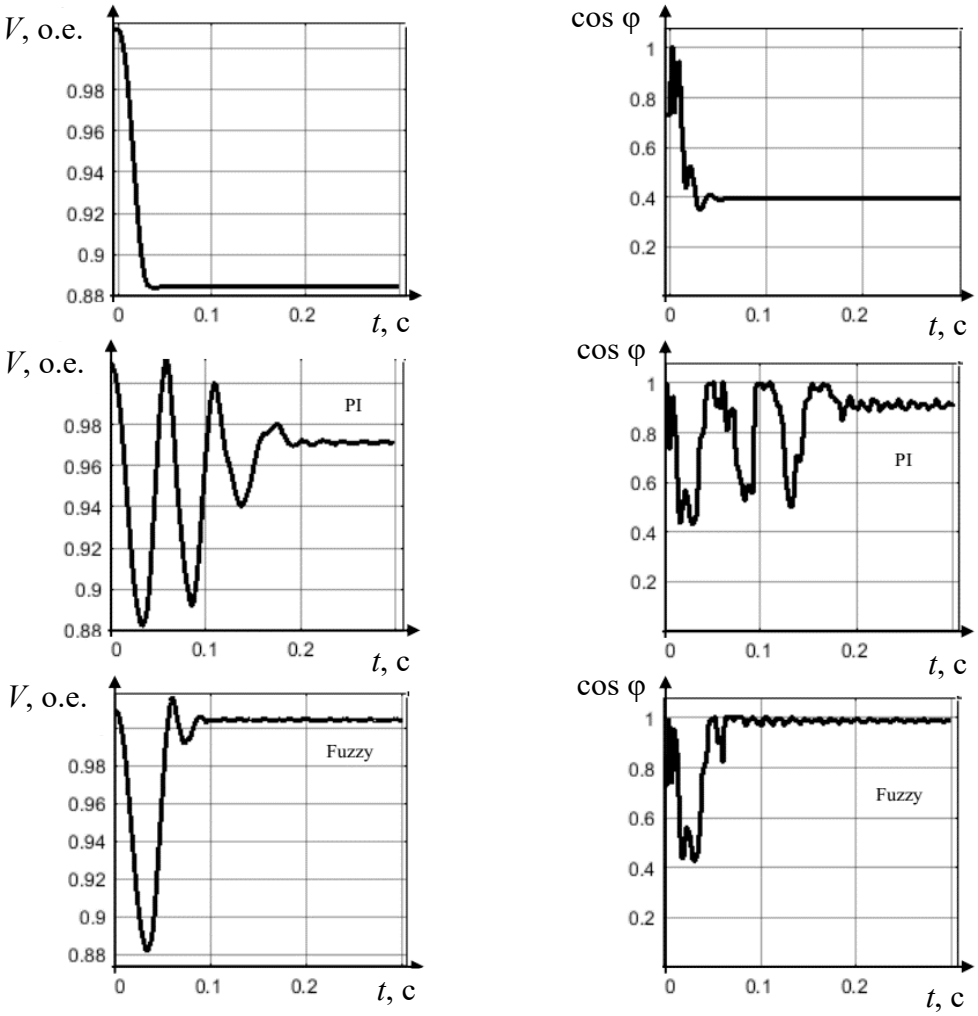

Рис. 7. Регулирование напряжения и коэффициента мощности

Для систем с переменной и резкопеременной нагрузкой особое значение имеет время переходного процесса. Нечёткий регулятор в системе управления СТК позволяет повысить её быстродействие почти в 2 раза по сравнению с ПИ-регулятором. На рис. 8 показаны результаты работы обоих регуляторов в системе с переменной нагрузкой. Так как изменение нагрузки происходит достаточно быстро, ПИ-регулятор не успевает выйти на установившиеся значения напряжения и коэффициента мощности. В сравнении с ним нечёткий регулятор позволяет получить лучшие результаты по стабилизации напряжения.

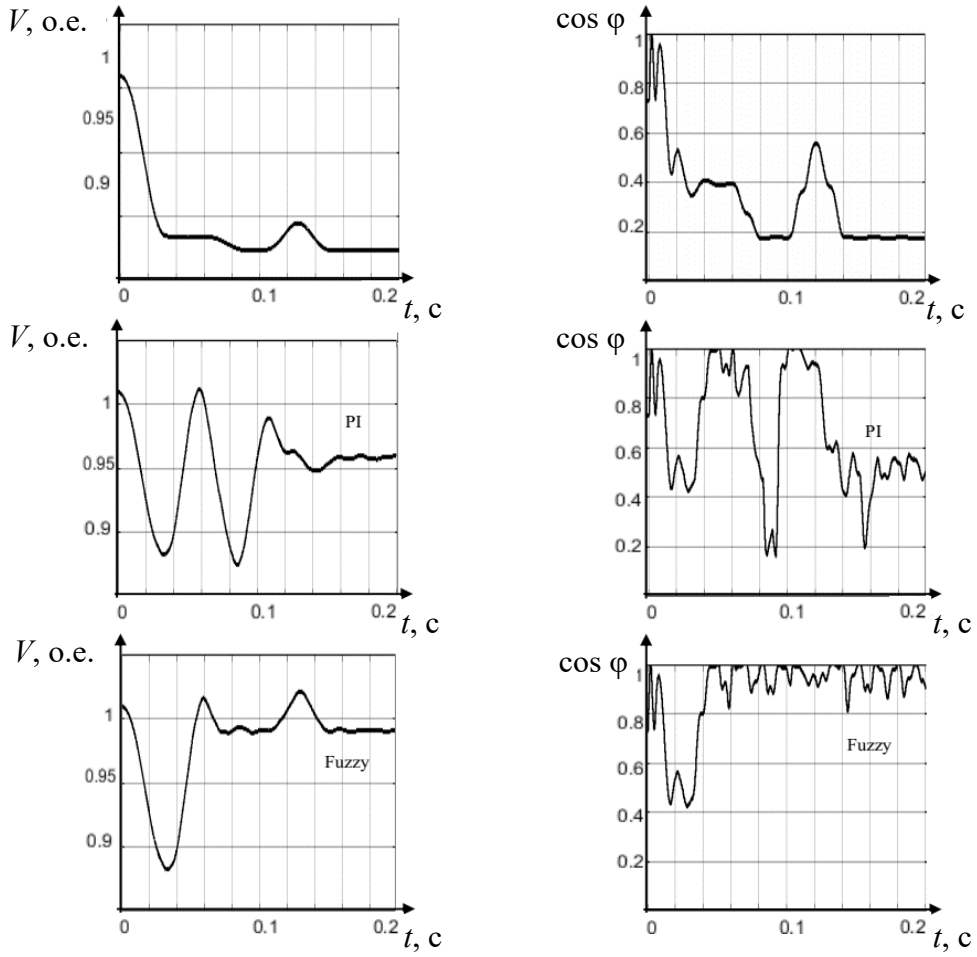

Рис. 8. Регулирование напряжения и коэффициента мощности
в системе с резкопеременной нагрузкой

Несмотря на то что изменения нагрузки, соответствующие процессам внутри печи, носят случайный характер, эти изменения происходят в некоторых диапазонах, которые определяются режимами печи при переключении обмоток печного трансформатора и реактора. На рис. 9 показан приближённый график изменений вводимой в печь мощности при таких переключениях для соблюдения программы плавки металла. Такие изменения осуществляются в определённые моменты времени, а значит, их можно учесть в процессе работы нечёткого регулятора при помощи упреждающего сигнала.

Как упоминалось выше, увеличение количества входных переменных регулятора нежелательно, поэтому лучше скорректировать одну из уже имеющихся переменных. Переключение режимов печи приводит к быстрому изменению мощности, а значит, и быстрому изменению уровня напряжения. Такие изменения в системе характеризуются переменной *de*/*dt*. Если вывести эту пе-

ременную в область быстрых изменений (см. рис. 10) до наступления самих изменений, это позволит осуществлять компенсацию одновременно с изменением уровня напряжения.

Рис. 9. График нагрузки дуговой сталеплавильной печи

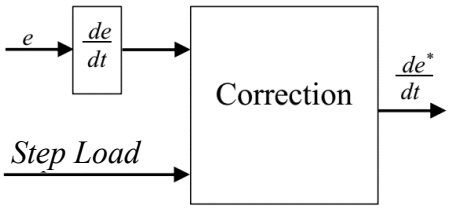

Рис. 10. Коррекция сигнала производной отклонения, учитывающая изменение режима нагрузки

На рис. 11 показаны графики изменения уровня напряжения в момент переключения мощности. Оба сигнала наблюдаются в системах управления с нечётким регулятором. Но в системе, учитывающей упреждающий сигнал переключения режима, наблюдается меньшее отклонение от заданного значения.

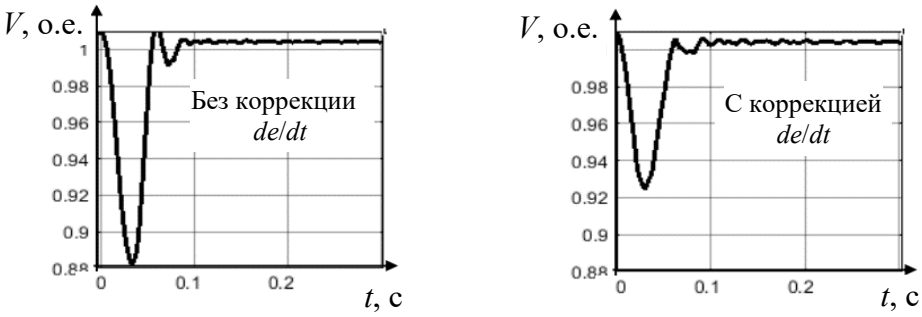

Рис. 11. Влияние упреждающего сигнала на работу нечёткого регулятора

Исследования, проведённые на имитационной модели системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи, говорят о важности выбора принципов функционирования системы управления статическим тиристорным компенсатором. В системе с ПИ-регулятором напряжение V, прежде чем прийти в установившиеся значение, успевает совершить несколько колебаний с весомым отклонением от заданного значения. В ситуациях с резкопеременной нагрузкой это приводит к полной нестабильности напряжения и невозможности скомпенсировать реактивную составляющую мощности в течение наиболее сложных периодов плавки. Применение нечёткого регулятора позволяет добиться лучших результатов по стабилизации напряжения и компенсации реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
2. Hingorani, Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE PRESS, WILEY INTERSCIENCE, 2000. – 428 p.
3. Juan Dixon, Luis Moran, Jose Rodrigues, Ricardo Domke, 2005 «Reactive Power Compensator Technologies: State-of-the-Art-Review», Proceeding of the IEEE, 93(12): p. 2144-2164.
4. Марков, Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электроустановок / Н. А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 20 с.

5. Pierre Giroux, Gibert Sybille. SVC (Detailed Model) [Электронный ресурс] / Mathworcs USA, 1994-2017. URL: http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model (дата обращения: 18.08.2017).
6. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
7. Николаев, А. А. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. В. Анохин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2016. – № 2. – С. 35-46.
8. Николаев, А. А. Система автоматического управления СТК с функцией контроля коэффициента реактивной мощности при стабилизации напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса «ДСП-СТК» / А. А. Николаев, В. В. Анохин, Ф. Ф. Муталлапова // Инновации в науке. – 2016. – № 11 (60). – С. 150-162.
9. Особенности построения систем управления статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи / А. А. Николаев, В. Е. Котышев, В. В. Анохин, Ф. Ф. Урманова // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов / под ред. С. И. Лукьянова, Н. В. Швидченко. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2015. – С. 11-20.
10. Купова, А. В. Параметры регулятора при управлении статическим тиристорным компенсатором в системе энергоснабжения дуговой печи / А. В. Купова, А. В. Купов // Электротехнические комплексы и системы: материалы международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017. – С. 20-24.
11. A. H. M. A. Rahim, H. M. Al-Maghraby, E. P. Nowicki, «Power system damping control through fuzzy static VAR compensator design including crisp optimum theory» Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, [s. l.], v. 11, n. 3/4, 2001, p. 185-194.
12. A. M. Abusorrah, «Optimal Power Flow Using Adaptive Fuzzy Logic Controllers», Mathematical Problems in Engineering [Электронный ресурс]. URL: https://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/975170/.
13. S. P. Nangrania, A. R. Singha, A. Chandanb, «Chaos driven instability control using interval type-2 fuzzy logic controller for better performance», Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 1491–1501, 2018.
14. N. Karpagam, D. Devaraj, P. Subbaraj, «Improved fuzzy logic controller for SVC in power system damping using global signals», Electrical Engineering, Vol. 91 Issue 7, March 2010. p. 395-404.
15. Ivanov, S. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
16. Соловьев, В. А. Разработка математической модели процесса резания рубительной машины / В. А. Соловьев, А. И. Малюкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 47-51.