

УДК 681.537

DOI 10.17513/snt.40082

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ПРЕДЕЛАХ ЗАДАННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Полищук В.И., Шувалова А.А.

*ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск,
e-mail: polischuk_vi@mail.ru*

В статье приведены результаты работы по созданию интеллектуальной автоматизированной системы управления перетоком мощности по линии электропередач в вынужденном режиме ее работы. Работа системы базируется на использовании регулирующего эффекта нагрузки и математического аппарата нечеткой логики. Приведена структура системы управления, разработана база правил для нечеткого регулятора и проведено математическое моделирование работы системы. Цель – синтез автоматизированной системы управления перетоком мощности по линии электропередач в пределах заданной пропускной способности и имитационное моделирование ее работы. Методы исследования – теория нечетких множеств, теория автоматического управления, пакет программ MatLab и Fuzzy Logic Toolbox, методы автоматической актуализации статической характеристики нагрузки. Имитационное моделирование показало, что использование регулирующего эффекта нагрузки способно ограничить переток активной мощности на перегруженной межсистемной линии электропередач до 10%. Автоматизация процесса управления вынужденным режимом работы элемента энергосистемы значительно повышает его эффективность за счет сокращения времени работы с 40 до 2 мин и исключает коммутационные отключения потребителей. Применение базы правил в работе нечеткого регулятора обеспечивает устойчивость регулирования напряжения в нормальных режимах и мощности в вынужденном режиме работы линии электропередач.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, теория нечетких множеств, нечеткий регулятор, регулирование напряжения под нагрузкой, пропускная способность линии электропередач

SYNTHESIS OF THE INTELLECTUAL AUTOMATED CONTROL SYSTEM BY ELECTRIC POWER TRANSPORT ON ELECTRIC MAINS WITHIN THE SET THROUGHPUT

Polischuk V.I., Shuvalova A.A.

Yugra State University, Khanty-Mansiysk, e-mail: polischuk_vi@mail.ru

In article results of work on creation of the intellectual automated control system by a capacity overflow on an electric main in the compelled mode of its work are resulted. System work is based on use of regulating effect of loading and a mathematical apparatus of indistinct logic. The control system structure is resulted, the base of rules is developed for an indistinct regulator and mathematical modelling of work of system is spent. Synthesis of the automated control system by a capacity overflow on an electric main within the set throughput and to imitating modelling of its work. Fuzzy set theory, automatic control theory, software package MatLab and Fuzzy Logic Toolbox, the methods of automatic actualisation of a direct current characteristic of loading. Imitating modelling has shown, that use of regulating effect of loading is capable to limit an active power flow on the overloaded intersystem electric main to 10%. Managerial process automation by the compelled mode of operation of an element of an electric power system, considerably raises its efficiency, at the expense of reduction of an operating time with 40 to 2 minutes and excludes switching-off of consumers. Application of base of rules in work of an indistinct regulator provides a pressure control stability in normal modes and capacity in the compelled mode of operation of an electric main.

Keywords: the automated control system, fuzzy set theory, the indistinct regulator, regulation of a closed-circuit voltage, throughput of an electric main

Введение

С внедрением современных информационных технологий в российскую энергетическую систему, противоаварийная автоматика (ПА) и системы автоматизированного диспетчерского управления (АСДУ) стали одними из самых развивающихся направлений, обеспечивающих надежность работы энергосистемы в целом. Применение интеллектуальных методов обработки данных открывает новые возможности для АСДУ и ПА в части автоматизации управления пре-

даварийных и послеаварийных режимов [1]. Одним из остро нуждающихся в автоматизации режимов является вынужденный режим работы элементов энергосистемы (ЭС). Вынужденный режим – это режим, в котором нагрузка на элементе энергосистемы выше номинального значения, но ниже аварийной уставки срабатывания ПА [1, 2]. Несмотря на то, что такой режим считается допустимым, он должен быть кратковременным. Стандарт СТО 59012820.27010.005-2013 ОАО «СО ЕЭС» требует от диспетчера лик-

видировать вынужденный режим за 40 мин [2]. В настоящее время диспетчерский персонал для ликвидации этого режима вынужден быстро предпринимать действия коммутационного характера (отключает часть потребителей) или вводит ограничения на энергопотребление [2].

В работе изложены результаты исследования по синтезу автоматизированной системы управления транспортом электроэнергии по линиям электропередач в пределах заданной пропускной способности (АСУПМ). Создание АСУПМ основано на знании величины регулирующего эффекта нагрузки (РЭН). Несмотря на то, что известно довольно много исследований по применению РЭН, практического развития они не получили, поскольку для корректных действий диспетчеру необходимы точные данные о величине и знаке коэффициента РЭН (КРЭН) конкретного узла энергосети [3–5]. Но с развитием теории и информационных технологий появляются технические средства, способные автоматически актуализировать изменение КРЭН [6, 7], и появляется возможность создания АСУПМ.

Цель исследования заключается в синтезе автоматизированной системы управления перетоком мощности по линии электропередач в пределах заданной пропускной способности и имитационному моделированию ее работы.

Материалы и методы исследования

Как было сказано выше, АСУПМ возможно реализовать на основе данных о РЭН. Если КРЭН положительный, то для снижения перетока мощности надо уменьшить напряжение, если же КРЭН имеет отрицательное значение, то напряжение надо увеличить [6], при КРЭН ≈ 0 изменение напряжения не повлияет на переток мощности [1]. Самыми распространенными

способами управления уровнем напряжения в ЭС являются: изменение напряжения на выводах генераторов (АРВ); изменение числа витков у трансформаторов (РПН, ПБВ); изменение напряжения устройствами компенсации реактивной мощности (БСК или синхронными компенсаторами) [1]. На электростанции реализовать управление напряжением для реализации поставленной задачи технически невозможно, поэтому АСУПМ вырабатывает управляющие воздействия на контроллеры РПН или БСК [1]. Микропроцессорные устройства АРПН уже по своему основному предназначению выдают сигналы на регуляторы и поддерживают необходимый уровень напряжения, имеют полностью настроенные исполнительные механизмы регулирования напряжения, а самое главное, в них возможна перенастройка на различные алгоритмы работы и допустима установка пользовательской программы. На АРПН возможно возложить дополнительную функцию по управлению перетоком мощности на перегруженном элементе сети.

Учитывая наличие контроллера мониторинга КРЭН, создание автоматизированной системы управления перетоком мощности (АСУПМ) по линии электропередач в пределах заданной пропускной способности производится по структурной схеме (рис. 1).

АСУПМ включает в себя:

- источник данных напряжения и мощности (X_U , X_P). Для мониторинга КРЭН необходимо использовать запротоколированные, приведенные к единой оси времени напряжение и мощность [6], взятые с автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) или оперативно-измерительного комплекса (ОИК) или телеизмерения (ТИ) [6];
- контроллер мониторинга КРЭН [6, 7];
- регулятор;
- АРПН и/или АБСК [1].

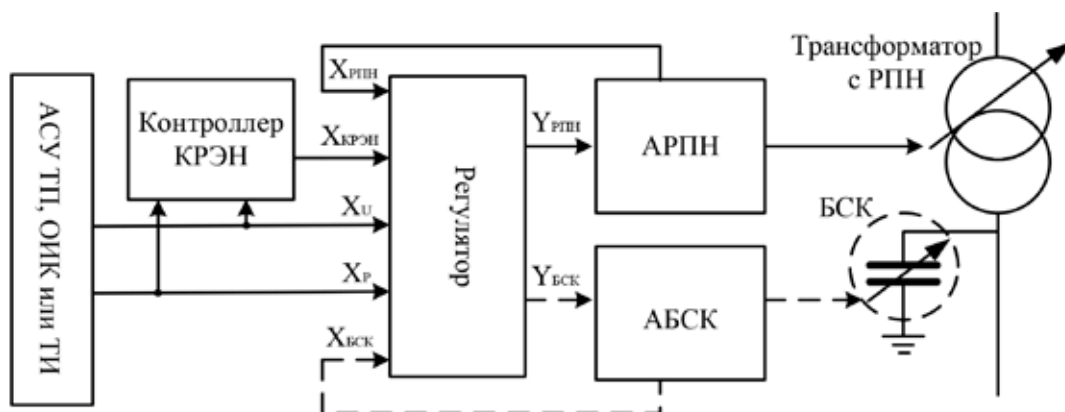


Рис. 1. Блок-схема функциональной структуры АСУПМ

Центральным элементом АСУПМ является регулятор. Проанализировав научные работы по автоматизации управления напряжением в узлах ЭС [8, 9], за основу взят нечеткий регулятор (НР).

Явными преимуществами при решении поставленной задачи являются:

- устойчивость процесса регулирования (робастность);
- быстродействие выше (НР – 4,3 с, ПИД – 9,5 с);
- у НР проще описание динамического процесса работы объекта регулирования.

Входными параметрами на входе регулятора являются: напряжение X_U , активная мощность X_P , коэффициент регулирующего эффекта нагрузки $X_{КРЭН}$, номер ступени РПН трансформатора $X_{РПН}$, номер ступени блока статических конденсаторов $X_{БСК}$. На выходе регулятора формируются дискретные управляющие сигналы $Y_{РПН}$ и/или

$Y_{БСК}$, принимающие значения -1, 0 или +1. Контроллер КРЭН с входными параметрами напряжения X_U и активной мощности X_P , мониторит изменения РЭН, выдавая на выходе КРЭН.

Работа регулятора содержит три этапа: фаззификации, логического заключения и дефаззификации.

Для лингвистических функций принадлежности приняты три обозначения: **S** (small) – параметр меньше номинала и для крайней низкой ступени регулирования; **N** (normally) – номинальное значение параметра и рабочее положение ступени регулирования; **B** (big) – параметр выше номинала и крайняя высокая ступень регулирования [1].

Диапазон регулирования определяется исходя из технических ограничений по возможному изменению уровня напряжений и находится в границах +15% $U_{ном}$ [1].

№	X_U	X_P	$X_{КРЭН}$	$X_{РПН}$	$X_{БСК}$	Управление		№	X_U	X_P	$X_{КРЭН}$	$X_{РПН}$	$X_{БСК}$	Управление	
						БСК	РПН							БСК	РПН
1	N	S	-	S	S	0 (стойм)	0 (стойм)	42	S	N	-	N	N	0 (стойм)	0 (стойм)
2	B	S	-	S	S	0 (стойм)	U1 (вверх)	43	N	N	-	B	N	0 (стойм)	0 (стойм)
3	S	S	-	S	S	U1 (вверх)	0 (стойм)	44	B	N	-	B	N	0 (стойм)	0 (стойм)
4	N	S	-	N	S	0 (стойм)	0 (стойм)	45	S	N	-	B	N	0 (стойм)	0 (стойм)
5	B	S	-	N	S	0 (стойм)	U1 (вверх)	46	N	N	-	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)
6	S	S	-	N	S	U1 (вверх)	0 (стойм)	47	B	N	-	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)
7	N	S	-	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)	48	S	N	-	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)
8	B	S	-	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)	49	N	N	-	N	B	0 (стойм)	0 (стойм)
9	S	S	-	B	S	U1 (вверх)	0 (стойм)	50	B	N	-	N	B	0 (стойм)	0 (стойм)
10	N	S	-	S	N	0 (стойм)	0 (стойм)	51	S	N	-	N	B	0 (стойм)	0 (стойм)
11	B	S	-	S	N	U1 (вниз)	0 (стойм)	52	N	N	-	B	B	0 (стойм)	0 (стойм)
12	S	S	-	S	N	U1 (вверх)	0 (стойм)	53	B	N	-	B	B	0 (стойм)	0 (стойм)
13	N	S	-	N	N	0 (стойм)	0 (стойм)	54	S	N	-	B	B	0 (стойм)	0 (стойм)
14	B	S	-	N	N	U1 (вниз)	0 (стойм)	55	-	B	S	S	S	U1 (вверх)	0 (стойм)
15	S	S	-	N	N	U1 (вверх)	0 (стойм)	56	-	B	S	N	S	U1 (вверх)	0 (стойм)
16	N	S	-	B	N	0 (стойм)	0 (стойм)	57	-	B	S	B	S	U1 (вверх)	0 (стойм)
17	B	S	-	B	N	U1 (вниз)	0 (стойм)	58	-	B	S	S	N	U1 (вверх)	0 (стойм)
18	S	S	-	B	N	U1 (вверх)	0 (стойм)	59	-	B	S	N	N	U1 (вверх)	0 (стойм)
19	N	S	-	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)	60	-	B	S	B	N	U1 (вверх)	0 (стойм)
20	B	S	-	S	B	U1 (вниз)	0 (стойм)	61	-	B	S	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)
21	S	S	-	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)	62	-	B	S	N	B	0 (стойм)	U1 (вниз)
22	N	S	-	N	B	0 (стойм)	0 (стойм)	63	-	B	S	B	B	0 (стойм)	U1 (вниз)
23	B	S	-	N	B	U1 (вниз)	0 (стойм)	64	-	B	N	S	S	0 (стойм)	0 (стойм)
24	S	S	-	N	B	0 (стойм)	U1 (вниз)	65	-	B	N	N	S	0 (стойм)	0 (стойм)
25	N	S	-	B	B	0 (стойм)	0 (стойм)	66	-	B	N	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)
26	B	S	-	B	B	U1 (вниз)	0 (стойм)	67	-	B	N	S	N	0 (стойм)	0 (стойм)
27	S	S	-	B	B	0 (стойм)	U1 (вниз)	68	-	B	N	N	N	0 (стойм)	0 (стойм)
28	N	N	-	S	S	0 (стойм)	0 (стойм)	69	-	B	N	B	N	0 (стойм)	0 (стойм)
29	B	N	-	S	S	0 (стойм)	0 (стойм)	70	-	B	N	S	B	0 (стойм)	0 (стойм)
30	S	N	-	S	S	0 (стойм)	0 (стойм)	71	-	B	N	N	B	0 (стойм)	0 (стойм)
31	N	N	-	N	S	0 (стойм)	0 (стойм)	72	-	B	N	B	B	0 (стойм)	0 (стойм)
32	B	N	-	N	S	0 (стойм)	0 (стойм)	73	-	B	B	S	S	0 (стойм)	U1 (вверх)
33	S	N	-	N	S	0 (стойм)	0 (стойм)	74	-	B	B	N	S	0 (стойм)	U1 (вверх)
34	N	N	-	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)	75	-	B	B	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)
35	B	N	-	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)	76	-	B	B	S	N	0 (стойм)	U1 (вверх)
36	S	N	-	B	S	0 (стойм)	0 (стойм)	77	-	B	B	N	N	U1 (вниз)	0 (стойм)
37	N	N	-	S	N	0 (стойм)	0 (стойм)	78	-	B	B	B	N	U1 (вниз)	0 (стойм)
38	B	N	-	S	N	0 (стойм)	0 (стойм)	79	-	B	B	S	B	U1 (вниз)	0 (стойм)
39	S	N	-	S	N	0 (стойм)	0 (стойм)	80	-	B	B	N	B	U1 (вниз)	0 (стойм)
40	N	N	-	N	N	0 (стойм)	0 (стойм)	81	-	B	B	B	B	U1 (вниз)	0 (стойм)
41	B	N	-	N	N	0 (стойм)	0 (стойм)								

Рис. 2. База правил

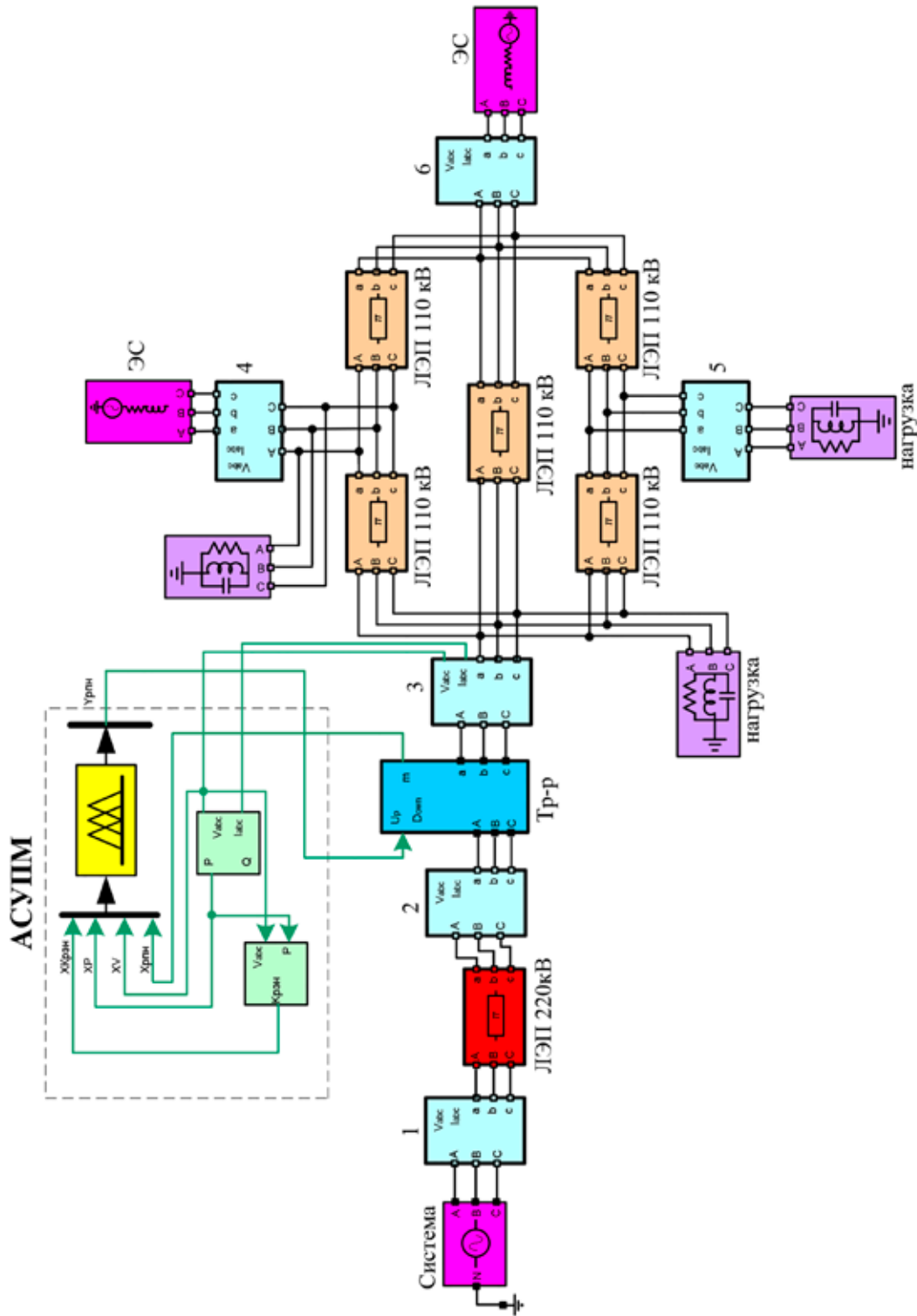


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели рабочего процесса АСУИМ

В процессе фаззификации применялись четыре вида функций принадлежности: z -подобная (zmf); s -подобная (smf); треугольная ($trimf$) и трапециевидная ($trapmf$).

При создании базы правил использовался алгоритм Мамдани [10]. Правило на базе алгоритма Мамдани выглядит как: ЕСЛИ «ХУ= N» И «ХР= S» И «ХРЭН= N» И «ХРПН= N» И «ХБСК= N» ТО «У_{РПН} = N (0 стоим)» И «У_{БСК} = N (0 стоим)»

Применительно к решаемой задаче количество правил можно значительно уменьшить, если учесть особенности регулирования в различных режимах. При отсутствии перегрузки, то есть когда значение мощности «N» или «S», учет параметра ХРЭН можно исключить из базы правил. В этих режимах регулятор будет работать как регулятор напряжения. В режиме же перегрузки, когда значение мощности «В», можно исключить из базы правил учет параметра ХУ, поскольку при перегрузке регулирование ведется на основе данных ХРЭН. Количество правил при этом сокращается с 243 до 81, что позволяет значительно упростить базу правил и обеспечить устойчивость работы АСУПМ. Все правила приведены в таблице (рис. 2), в которой желтым цветом выделены правила, работающие в режиме перегрузки.

При создании базы правил учитывалось, что переключение РПН на ступень «вверх» уменьшает напряжение на выводах трансформатора, переключение на ступень «вверх» БСК подключает группу конденсаторов, что увеличивает напряжение на выводах.

Первоначально управляющее воздействие выдается на АБСК и только после достижения номера крайней ступени, управляющее воздействие выдается на АРПН.

Численное значение управляющих параметров U на выходе регулятора определяется путем дефаззификации нечеткого множества по методу центра тяжести.

Результаты исследования и их обсуждение

Для апробации основных положений, положенных в работу АСУПМ, была создана имитационная модель части ЭС с межсистемной линией связи 220 кВ. На линии со стороны энергодефицитной части ЭС установлен трансформатор 220/110 кВ с АРПН регулирующей напряжением 110 кВ. В энергодефицитной части ЭС имеются три крупные нагрузки, пять линий электропередач, две электростанции, КРЭН на узле присоединения межсистемной линии электропередач имеет ненулевое значение.

Модель энергосистемы с АСУПМ реализована в MatLAB Simulink (рис. 3), с пакетом Fuzzy Logic Toolbox, позволяющим имитировать работу АСУПМ.

Энергодефицитная часть энергосистемы на 110 кВ состоит из узлов 3, 4, 5, 6 с электростанциями (ЭС) в узлах 4, 6 нагрузкой в узлах 3, 4, 5. Между энергосистемой (узел 1) и энергодефицитной частью энергосистемы (узел 3) имеется межсистемная линия (ЛЭП 220 кВ) с трансформатором (Тр-р) к АРПН которого подключена АСУПМ.

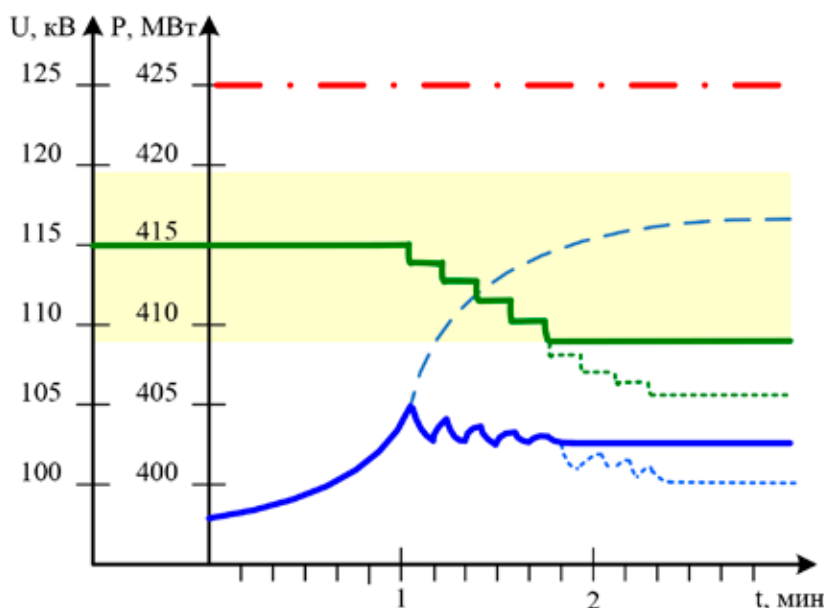


Рис. 4. Графики рабочего процесса АСУПМ

Напряжения в узлах следующие: во 2-м – 227,84 кВ, в 3-м – 113,98 кВ, в 4-м – 111,2 кВ, в 5-м – 111,03 кВ, в 6-м – 115,03 кВ. Суммарная потребляемая нагрузкой мощность – 509,59 МВт. Номинальный переток мощности по ЛЭП 220 кВ – 400 МВт, аварийно допустимый переток мощности по ЛЭП 220 кВ – 425 МВт. Имеется техническое ограничение по напряжению – не ниже 109 кВ, а также в модель введены временные параметры работы механизмов РПН с перерывом 1,5 с от одного переключения до другого для затухания коммутационных возмущений. График изменения напряжения и мощности при работе АСУПМ показан на рис. 4 [1].

Из рис. 4 видно, что, как только мощность потребления в энергодефицитной части энергосистемы достигла уровня перегрузки (405 МВт), АСУПМ на основе данных КРЭН выработал управляющее воздействие на РПН. Регулирование закончилось после пяти переключений, напряжение при этом достигло ограничения 109 кВ (узел 5), переток снизился до 402 МВт (3,7%) [1]. АСУПМ работает до технического ограничения, то есть до достижения мощности нормального значения или до ограничения по напряжению или до достижения крайних значений ступеней переключения. Например, при отсутствии ограничения по напряжению АСУПМ отработал до нормального перетока мощности (400 МВт) после восьми переключений за 1 мин 55 с (штриховые линии на рис. 4) [1].

Заключение

Имитационное моделирование показало, что использование регулирующего эффекта нагрузки способно ограничить переток активной мощности на перегруженной межсистемной линии электропередач до 10%.

Автоматизация процесса управления вынужденным режимом работы элемента энергосистемы значительно повышает его эффективность за счет сокращения времени работы с 40 до 2 мин и исключает коммутационные отключения потребителей.

Применение базы правил в работе нечеткого регулятора обеспечивает устойчивость регулирования напряжения в нормальных режимах и мощности в вынужденном режиме работы линии электропередач.

Список литературы

1. Шувалова А.А., Полищук В.И., Постоанкова К.Ю. Концепция построения автоматизированной системы управления перетоком активной мощности по линиям электропередач в режиме перегрузки // Автоматизация в промышленности. 2023. № 6. С. 23–26. DOI: 10.25728/avtпром.2023.06.04.
2. СТО 59012820.27010.005-2013 ОАО «СО ЕЭС». Правила перехода на работу в вынужденном режиме в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС»: стандарт организации: принят и введен в действие приказом ОАО «СО ЕЭС» от 19.12.2013 № 455 / разработан ОАО «СО ЕЭС». М., 2013. 27 с.
3. Буслов В.В., Чемборисова Н.Ш. Влияние статических характеристик современных видов нагрузок на режимы работы электрических сетей // Вестник Московского энергетического института. 2021. № 2. С. 20–28.
4. Babaei A., Ziomek W., Gole A.M. Transient characteristics of on-load tap changers during change-over operation // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 197. 107296. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.10729.
5. Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учетом мощности короткого замыкания энергосистемы // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 19–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25.
6. Шувалова А.А., Полищук В.И. Методика и устройство актуализации регулирующего эффекта нагрузки узла энергосистемы // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 2 (69). С. 144–152. DOI: 10.18822/byusu202302144-152.
7. Полищук В.И., Панкратов А.В., Кондрашов М.А., Шувалова А.А. Автоматизированная идентификация статических характеристик нагрузки по напряжению «Идентификатор СХН» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2021661878. Патентообладатель Кондрашов М.А. 2021. Бюл. № 7.
8. Рысев П.В., Пешко М.С., Шепелев А.О. Интеллектуальная система регулирования напряжения в распределительной электрической сети на основе нечеткой логики // Вестник Югорского государственного университета. 2022. № 3 (66). С. 107–117. DOI: 10.18822/byusu202203107-117.
9. Пантелеев В.И., Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю. Анализ эффективности применения нечеткого регулирования уровня напряжения в распределительных сетях // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 5. С. 536–549. DOI: 10.17516/1999-494X-0052.
10. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 284 с.