

Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭНЕРГОУЗЛА ЗА СЧЕТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОНФИГУРАЦИИ СЕТИ

Развитие объектов распределенной генерации в промышленных системах электроснабжения приводит к усложнению возможных установившихся эксплуатационных и аварийных режимов. При аварийном или плановом отключении питающих линий или мощных трансформаторов собственных электростанций статическая устойчивость генераторов может снизиться по отношению к нормативным показателям. На основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательного утяжеления разработан алгоритм анализа статической устойчивости промышленных генераторов при параллельной работе с энергосистемой. В качестве параметра утяжеления принимается угол ротора генератора. Данный алгоритм положен в основу программного комплекса расчета установившихся режимов и анализа статической устойчивости промышленных систем электроснабжения КАТРАН 9.0. На основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательных интервалов разработан алгоритм расчета переходных процессов. Разработанные алгоритмы и программный комплекс позволяют прогнозировать послеаварийные установившиеся режимы, оценивать статическую и динамическую устойчивость промышленных генераторов и при необходимости разрабатывать соответствующие мероприятия. Приведен анализ статической и динамической устойчивости синхронных генераторов на примере системы электроснабжения действующего крупного промышленного предприятия. Замкнутая система электроснабжения содержит генераторы различной мощности и различной электрической удаленности друг относительно друга и энергосистемы. Сделаны выводы о влиянии конфигурации системы электроснабжения на запас статической устойчивости в послеаварийных режимах и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети. Даны рекомендации по повышению статической устойчивости узла в послеаварийных режимах. К таким рекомендациям, прежде всего, отнесены коррекция загрузки синхронных генераторов по активной и реактивной мощности в послеаварийных режимах. Определена наилучшая по динамической устойчивости конфигурация сети. Разработанный программный комплекс может быть использован на этапе планирования нормальных, аварийных и послеаварийных режимов оперативно-диспетчерским персоналом электростанций или группами режимов электротехнических лабораторий.

Ключевые слова: распределенная генерация, статическая и динамическая устойчивость, промышленное предприятие, установившийся режим, переходный режим, программное обеспечение, система электроснабжения, линия электропередачи, трансформатор, синхронный генератор.

ВВЕДЕНИЕ

При планировании режимов промышленных электростанций одним из основных условий надежной работы системы электроснабжения является обеспечение статической и динамической устойчивости генераторов и нагрузки в нормальных и послеаварийных режимах [1-4]. Исследованию статической и динамической устойчивости генераторов посвящено большое число работ [5-8]. Однако они ориентированы на крупные энергосистемы, имеющие генераторы большой мощности, соединенные с энергосистемами линиями электропередачи большой пропускной способности [9-13]. Такие исследования допускают эквивалентирование генераторов в пределах одной электростанции или нескольких, расположенных электрически близко по отношению друг к другу, а также учитывают распределенность параметров питающих линий электропередачи [14-16].

При исследовании статической устойчивости промышленных генераторов условия становятся принципиально иными [17, 18]. Прежде всего генераторы электрически удалены друг от друга через трансформаторы и реакторы, имеют различные технические характеристики и питают электродвигатели переменного тока большой мощности. Объединение в этих

условиях не всегда допустимо, поскольку помимо изложенного на устойчивость оказывают влияние автоматические регуляторы возбуждения и скорости, которые могут иметь различные настроечные параметры. Кроме того, в определенных условиях появляется возможность выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу, что требует особого подхода при исследовании подобных режимов. Исследование статической устойчивости также является неотъемлемой частью планирования оптимальных режимов [19, 20]. В связи с этим возникает необходимость исследования статической устойчивости промышленных синхронных генераторов в нормальных и послеаварийных режимах по алгоритму, отличающемуся от алгоритма анализа генераторов крупных энергосистем.

При исследовании динамической устойчивости следует отметить, что проблема обеспечения динамической устойчивости наиболее актуальна в первую очередь для синхронных машин, в частности при возникновении короткого замыкания в линиях электропередачи, и для двигателей при понижении напряжения в питающей сети [21-25].

Исследование проблемы динамической устойчивости синхронной машины состоит как в проверке сохранения синхронизма при заданном нарушении режима, так и в определении предельно допустимого возмущения, при котором машина выпадет из синхро-

низма, т.е. в определении границы динамической устойчивости [26-31].

Вопросы исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем можно разделить на три группы [1, 3]: определение параметров режимов, предельных по условиям устойчивости; настройка регулирующих устройств и автоматики; проверка динамической устойчивости при заданных исходных условиях [32, 33].

МЕТОДИКИ

Существующие программные комплексы, упомянутые в [9, 14], ориентированы на крупные энергосистемы и не всегда учитывают особенности промышленных электростанций. На кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Носова создан программный комплекс «КАТРАН 9.0», позволяющий оценивать статическую и динамическую устойчивость синхронных генераторов в различных режимах работы.

В основу программного комплекса для исследования статической устойчивости положен алгоритм, основанный на сочетании методов последовательного эквивалентирования и последовательного утяжеления [34-36]. Метод последовательного эквивалентирования применен для расчета установившихся режимов промышленных систем электроснабжения, содержащих большое число генераторов и несколько точек связи с электроэнергетической системой. Метод последовательного утяжеления применен для анализа статической устойчивости генераторов с учетом условий связи с энергосистемой. Так, при параллельной работе с энергосистемой в расчетную схему вводится узел неизменного напряжения и увеличивать нагрузку для определения предельного режима работы не имеет смысла. Поэтому при параллельной работе сначала рассчитывается установившийся режим, из которого определяются углы роторов и ЭДС генераторов исследуемой электростанции. После этого выбирается синхронный генератор, у которого увеличивают с заданным шагом угол ротора. Для каждого нового угла производят свой расчет установившегося режима. По полученным результатам строится угловая характеристика генератора и делается вывод о коэффициенте запаса статической устойчивости. При необходимости учитываются ограничения по вырабатываемой активной и реактивной мощности. Максимальную электромагнитную мощность генератора определяют при помощи угловых характеристик. Мощность турбины принимают из исходного установившегося режима. Алгоритм анализа статической устойчивости при параллельной работе приведен на **рис. 1**.

Для исследования динамической устойчивости используется сочетание методов последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов.

Исследование статической и динамической устойчивости проводилось на примере промышленных электростанций Магнитогорского энергетического узла. Схема его электрических соединений приведена на **рис. 2**.

Данный объект является удобным для исследований, поскольку содержит большое число электростанций, линии электропередачи напряжением 10-220 кВ и имеет кольцевую конфигурацию. Как показано на ри-

сунке, кольцо 110 кВ является разомкнутым с целью снижения токов короткого замыкания. Как показали расчеты, размыкание кольца не оказало существенного влияния на запас статической устойчивости. При этом образовались два замкнутых контура 110 кВ с перенесением связи ТЭЦ и ЦЭС в сети 220 кВ. Кольцо 220 кВ является замкнутым. В состав исследуемого энергетического узла входят три промышленных электростанции – центральная (ЦЭС), паровоздуховная (ПВЭС-2) и теплофикационная (ТЭЦ). Все электростанции имеют различные схемы выдачи мощности, что представляет интерес для исследования статической и динамической устойчивости. Генераторы включены в различные точки сети, имеют различные значения углов роторов и разнотипные (**табл. 1**). Результаты анализа статической устойчивости были в нормальном режиме работы приведены в **табл. 1**.

Как видно из **табл. 1**, коэффициент запаса статической устойчивости при заданной загрузке генераторов лежит в нормативных пределах для всех генераторов, кроме генератора № 1 ПВЭС-2. Как будет показано ниже, этот генератор имеет наибольшую электрическую удаленность от электроэнергетической системы, чем объясняются полученные результаты. Как показали расчеты, повышения устойчивости можно добиться даже небольшим снижением загрузки по активной мощности, повышением по реактивной, а также использованием устройств РПН и ПБВ трансформаторов связи с энергосистемой.

Далее с целью анализа статической устойчивости рассчитывались режимы, при которых отключается одна из линий связи электростанций. На **рис. 3, 4** приведены упрощенные однолинейные схемы ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС-2, где указаны отключаемые линии.

Результаты расчетов представлены в **табл. 2**. Сравнивая данный режим с нормальным установившемся режимом для ТЭЦ, можно сделать вывод, что отключение линии практически не повлияло на статическую устойчивость, поскольку коэффициенты запаса остались прежними. Что касается генераторов ЦЭС, можно сделать вывод, что статическая устойчивость незначительно снижается. На ПВЭС-2 недостаточным запасом статической устойчивости обладает ТГ-1. Далее были исследованы режимы при одновременном отключении питающей линии и трансформатора электростанции. Результаты расчета сведены в **табл. 3**.

При одновременном отключении силового трансформатора и питающей линии на ТЭЦ у большинства генераторов запас по статической устойчивости практически не меняется, тогда как генератор ТГ-2 близок к нарушению устойчивости, а у генератора ТГ-3 запас статической устойчивости снизился, но остался в пределах нормы. На ЦЭС малым запасом устойчивости обладают генераторы ТГ-2, ТГ-5, ТГ-6, а у остальных генераторов запас по устойчивости находится в допустимых пределах. Генератор ТГ-1 на ПВЭС-2 неустойчив. На ЦЭС у генераторов ТГ-5, ТГ-8 коэффициент запаса по статической устойчивости близок к минимальному значению. На ТЭЦ устойчивость сохраняется на всех генераторах, а на ПВЭС-2 ухудшается устойчивость генераторов ТГ-1 и ТГ-4. Таким образом, в послеаварийных режимах статическая устойчивость генераторов снижается.

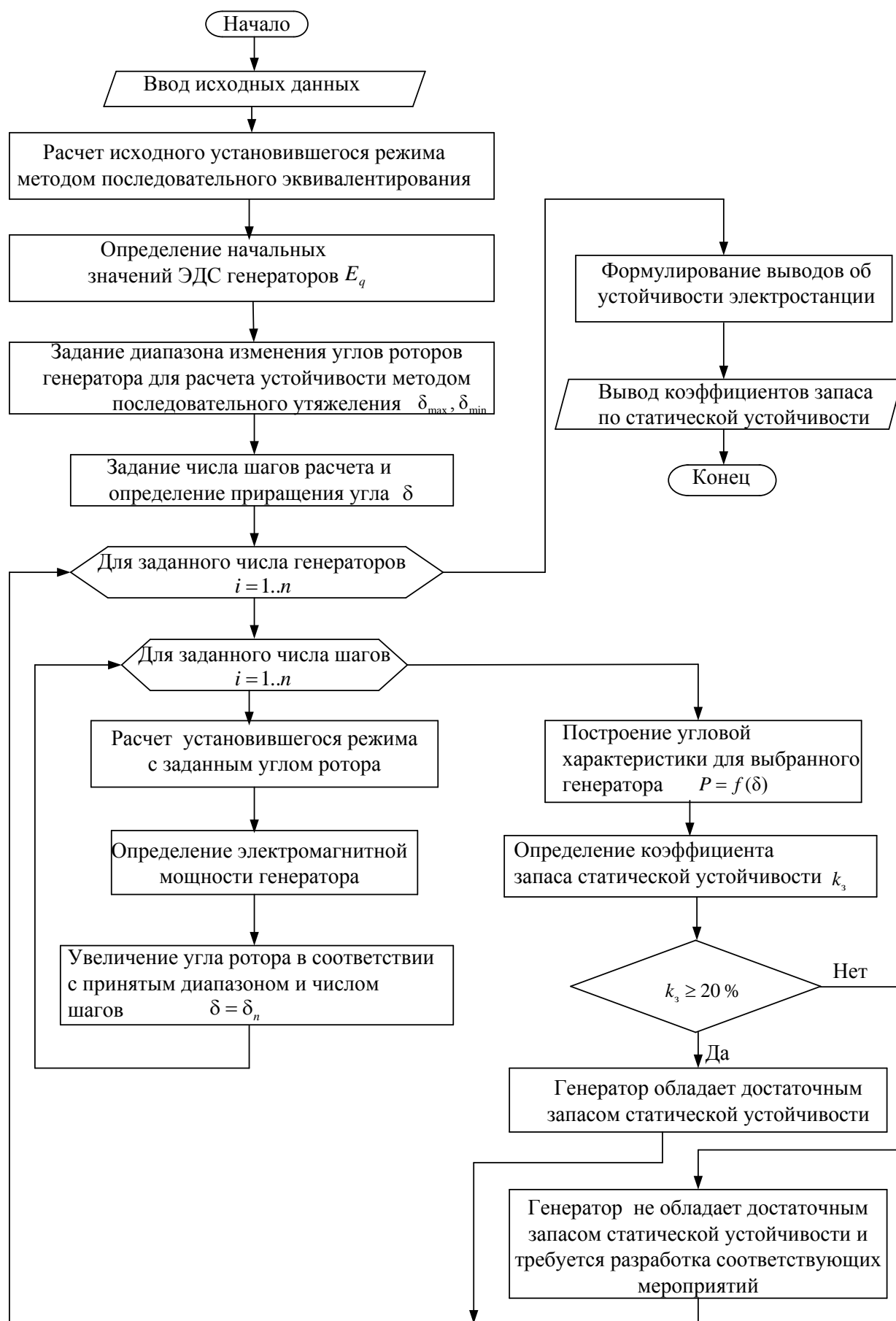


Рис. 1. Алгоритм анализа статической устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе с энергосистемой

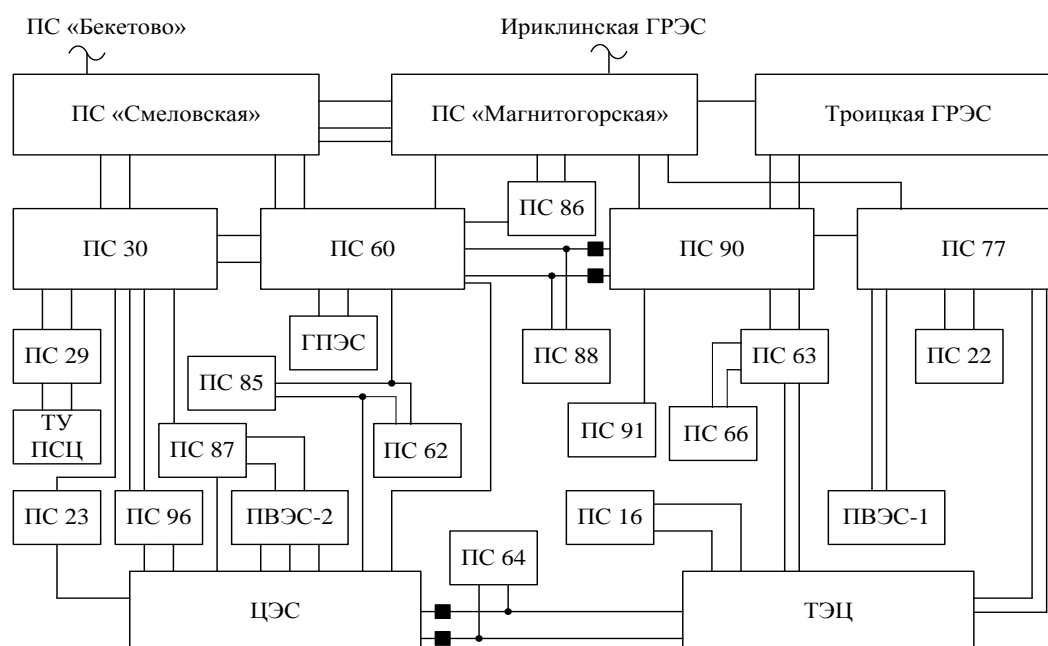


Рис. 2. Упрощенная схема Магнитогорского энергоузла

Таблица 1

Нормальный режим работы генераторов

Наименование	Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, МВт	Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ	Мощность турбины, P_t , МВт	Мощность электромагнитная максимальная, $P_{\text{мах}}$, МВт	Коэффициент запаса k_3 , %
ТЭЦ, ТГ-1	50	10,5	49,839	95,00	90,6
ТЭЦ, ТГ-2	50	10,5	51,896	90,00	73,4
ТЭЦ, ТГ-3	50	10,5	52,585	92,25	75,4
ТЭЦ, ТГ-4	60	10,5	62,406	85,43	36,9
ТЭЦ, ТГ-5	60	10,5	59,44	82,67	39
ТЭЦ, ТГ-6	60	10,5	58,881	89,25	51,5
ЦЭС, ТГ№1	12	3,15	11,84	19,94	68,4
ЦЭС, ТГ№2	12	3,15	12,25	21,26	73,5
ЦЭС, ТГ№3	40	10,5	41,24	71,6	73,6
ЦЭС, ТГ№4а	6	10,5	5,68	12,75	124,5
ЦЭС, ТГ№4б	6	10,5	5,63	12,70	125,6
ЦЭС, ТГ№5	25	10,5	28,01	50,6	80,6
ЦЭС, ТГ№6	25	10,5	27,4	47,5	73,3
ЦЭС, ТГ№7	25	10,5	29,0	51,1	76,2
ЦЭС, ТГ№8	40	10,5	42,2	67,9	60,9
Мини ТЭЦ	4	6,3	3,79	7,2	89,9
ПВЭС-2, ТГ№1	30	6,3	31,04	34	10
ПВЭС-2, ТГ№2	30	10,5	22,065	38,55	74,7
ПВЭС-2, ТГ№3	12	10,5	12,085	22,3	84,5
ПВЭС-2, ТГ№4	30	10,5	31,88	47,97	50,5

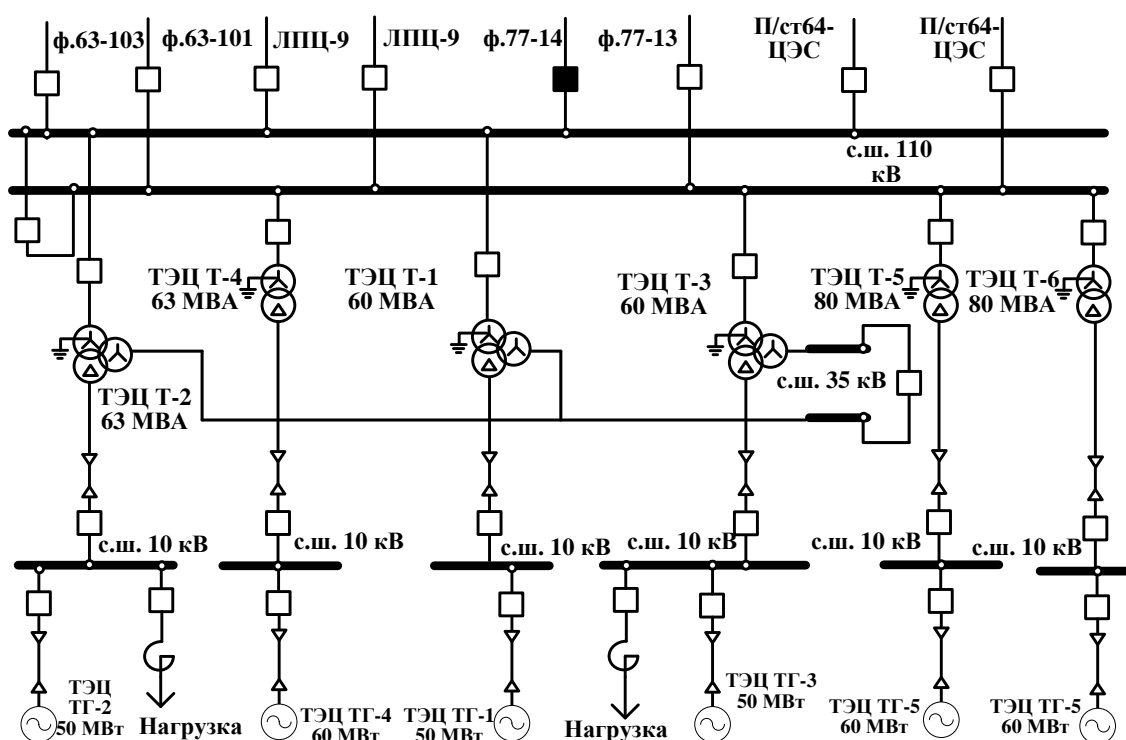


Рис. 3. Упрощенная однолинейная схема ТЭЦ с отключенным фидером ф.77-14

Таблица 2

Результаты расчета при отключении линий связи

Электростанция	ТЭЦ			ЦЭС		
Отключаемый фидер	Отключен ф.14, ПС 77			Отключен ф.14, ПС 30		
Искомые параметры	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	94,98	49,839	90,5	19,9	11,84	68,0
ТГ-2	90	51,896	73,4	21,23	12,25	73,3
ТГ-3	92,22	52,585	75,4	71,4	41,24	73,1
ТГ-4a	85,41	62,406	36,8	12,71	5,68	123,8
ТГ-4б	-	-	-	12,67	5,63	125,0
ТГ-5	82,6	59,44	39	50,44	28,01	80
ТГ-6	89,22	58,881	51,5	47,3	27,4	72,6
ТГ-7	-	-	-	50,93	29,00	75,6
ТГ-8	-	-	-	67,74	42,2	60,5
Электростанция	ПВЭС - 2			ПВЭС - 2		
Отключаемый фидер	Отключен ф.160, ЦЭС			Отключен ф.22 ПС 30		
Искомые параметры	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	33,5	31,04	5	-	-	-
ТГ-2	34,92	22,065	58,73	-	-	-
ТГ-3	-	-	-	22,22	12,085	84,1
ТГ-4	-	-	-	47,81	31,88	50

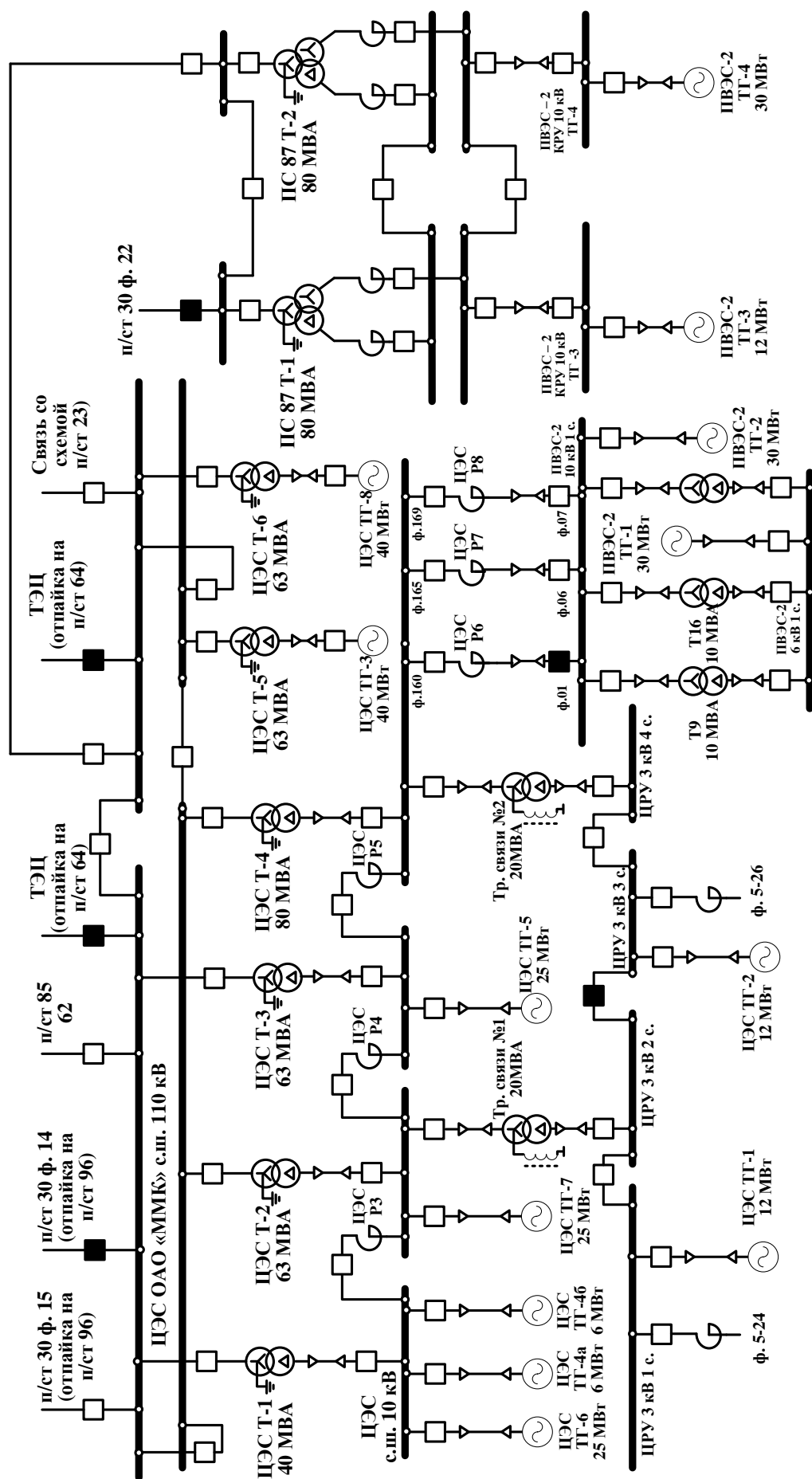


Рис. 4. Упрощенная однолинейная схема ЦЭС и ПВЭС-2 с отключенными фидерами

Таблица 3

Результаты расчета при отключении линий связи и трансформаторов

Электростанция	ТЭЦ			ЦЭС		
Отключаемый фидер	Отключен ф.14, ПС 77 + Отключен силовой трансформатор Т2			Отключен ф.14, ПС 30 + Отключены силовые трансформаторы Т1, Т3, Т4		
Искомые параметры	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	99	49,839	98,6	19,17	11,84	62,0
ТГ-2	64,6	51,896	24,5	14,62	12,25	19,3
ТГ-3	76,75	52,585	46	72,15	41,24	75,0
ТГ-4а	85,8	62,406	37,4	9,82	5,68	72,9
ТГ-4б	-	-	-	9,79	5,63	73,9
ТГ-5	83,0	59,44	39,6	36,68	28,01	31,0
ТГ-6	89,64	58,881	52,2	33,75	27,4	23,1
ТГ-7	-	-	-	47,48	29,00	63,7
ТГ-8	-	-	-	68,36	42,2	62,0
Электростанция	ПВЭС - 2			ПВЭС - 2		
Отключаемый фидер	Отключен ф.160, ЦЭС + Отключен силовой трансформатор Т9			Отключен ф.22 ПС 30 + Отключен силовой трансформатор Т2 (ПС 87)		
Искомые параметры	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %	P_{\max} , МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	31,86	31,04	3,21	-	-	-
ТГ-2	34,78	22,065	58,23	-	-	-
ТГ-3	-	-	-	20,73	12,085	71,61
ТГ-4	-	-	-	42,75	31,9	34

Разработанный программный комплекс позволяет выполнить оценку не только пределов статической устойчивости, но и динамической устойчивости генераторов собственных электростанций, при этом существенное влияние на динамическую устойчивость оказывает структура построения системы электроснабжения ОАО «ММК». Поскольку она имеет сложную замкнутую конфигурацию электрической сети, то возможно большое количество оперативных состояний, каждое из которых будет характеризоваться различной степенью устойчивости.

В работе рассмотрены следующие варианты: вариант 1 – кольцевая сеть замкнута; вариант 2 – кольцевая сеть разомкнута по существующей схеме; вариант 3 – кольцевая сеть поделена на два параллельных кольца путем отключения шиносоединительных выключателей на всех РУ-110 кВ; вариант 4 – деление кольцевой сети на узлы ЦЭС-ПС 30-ПС 96; ПС 90-ПС 63; ПС 77-ТЭЦ, ПС 60, связанные только по напряжению 220 кВ.

Исследование режимов КЗ с точки зрения анализа устойчивости заключается в анализе поведения синхронных генераторов, а также синхронных и асинхронных двигателей собственных нужд непосредственно в процессе КЗ и после его ликвидации. Для комплексной оценки той или иной конфигурации схемы с учетом режимов работы коммутационных аппаратов и токоведущих частей в работе проведен расчет и анализ значений токов КЗ и величин остаточных напряжений в сети 110 кВ. Для каждой из точек КЗ было выявлено предельное время отключения, при превышении которого нарушается динамическая устойчивость работы синхронных или асинхронных машин. В табл. 4 с учетом конфигурации внешней сети при КЗ на шинах 110 кВ ТЭЦ показано поведение генераторов ТЭЦ, приведены предельные времена отключения КЗ, поте-

ри активной мощности. Очевидно, рассматриваемые варианты практически равноценны по показателям динамической устойчивости. Вариант 3 обладает большей устойчивостью для ТГ-4,5,6, что объясняется их меньшей электрической удаленностью от точки короткого замыкания (Т-4,Т-5,Т-6 имеют меньшее значение u_k – 11,5 вместо 11,78%).

Аналогичным образом была исследована устойчивость генераторов ЦЭС (табл. 5).

Как видно из табл. 5, рассматриваемые варианты практически равноценны по показателям динамической устойчивости. Наибольшим предельным временем обладает вариант 3, где изменение углов роторов генераторов ЦЭС носит затухающий характер, хотя в других вариантах наблюдается раскачивание. Наибольшей динамической устойчивостью обладают варианты 2 и 3. При ТКЗ на сборных шинах 110 кВ ЦЭС-ПВЭС-2 наименее динамически устойчивыми являются ТГ-5,6,7 ЦЭС за счет электрической приближенности к точке ТКЗ. В вариантах 2 и 3 за счет отключения ШСВ осуществляется разделение вышеперечисленных наименее динамически устойчивых генераторов по секциям сборных шин, что исключает одновременное раскачивание этих генераторов и улучшает динамическую устойчивость всей схемы.

Наилучшей динамической устойчивостью при ТКЗ на сборных шинах 110 кВ ЦЭС будет обладать вариант 3, поскольку имеет большее предельное время отключения ТКЗ 0,5-0,6 с и меньшее отклонение углов роторов генераторов по сравнению с другими вариантами, где предельное время отключения ТКЗ 0,4 с. Изменение углов роторов приведено на рис. 5.

Исследование режима ТКЗ на шинах 110 кВ при различной конфигурации сети показало, что наилучшей динамической устойчивостью обладает вариант 3,

т.к. предельное время отключения ТКЗ было наибольшим, а наихудшей – вариант 4, кроме случая ТКЗ на ПС 60 и ПС 30. Также было выяснено, что отключение ШСВ на узловых подстанциях и замыкание кольца 110 кВ улучшают динамическую устойчивость. Максимальные углы роторов синхронных генераторов при ТКЗ в различных точках системы при изменении конфигурациях сети 110 кВ существующей схемы МЭУ наблюдаются у ТГ-4, исключением является ТКЗ на

ТЭЦ на I секции шин 110 кВ в варианте 3, где наибольший угол имеет ТГ-6.

Для повышения надежности работы электрооборудования системы электроснабжения и увеличения срока службы кроме проверки устойчивости необходимо выполнить прогнозирование остаточного ресурса и разработать рекомендации по выполнению текущих и планово-предупредительных ремонтов [37-40].

Таблица 4

Критерии оценки конфигурации схемы сети 110 кВ на примере генераторов ТЭЦ при коротком замыкании на шинах РУ-110 кВ

Схема сети 110 кВ	Максимальный угол ротора турбогенератора, град.	Предельное время отключения короткого замыкания, с	Потери активной мощности в сетях МПУ, МВт
Вариант 1	92 (ТГ-5)	0,3	11,44
Вариант 2	93 (ТГ-4,5)	0,3	14,89
Вариант 3 1 с.ш.	88 (ТГ-1)	0,6	12,59
Вариант 4	105 (ТГ-4), процесс затухает; 112 (ТГ-5), процесс затухает; 97 (ТГ-6), процесс затухает и вновь начинается раскачивание	0,3	15,03

Таблица 5

Критерии оценки конфигурации схемы сети 110 кВ на примере генераторов ЦЭС при коротком замыкании на шинах РУ-110 кВ

Схема сети 110 кВ	Максимальный угол ротора турбогенератора, град.	Предельное время отключения короткого замыкания, с	Потери активной мощности в сетях МПУ, МВт
Вариант 1	98 (ТГ-5,7), процесс затухает	0,3	11,44
Вариант 2	98 (ТГ-7), процесс затухает	0,3	14,89
Вариант 3	124 (ТГ-8) процесс монотонно затухает; 94 (ТГ-5) процесс монотонно затухает	0,4	12,59
Вариант 4	98 (ТГ-5), процесс затухает и вновь начинается раскачивание; 98 (ТГ-8), процесс монотонно затухает	0,3	15,03

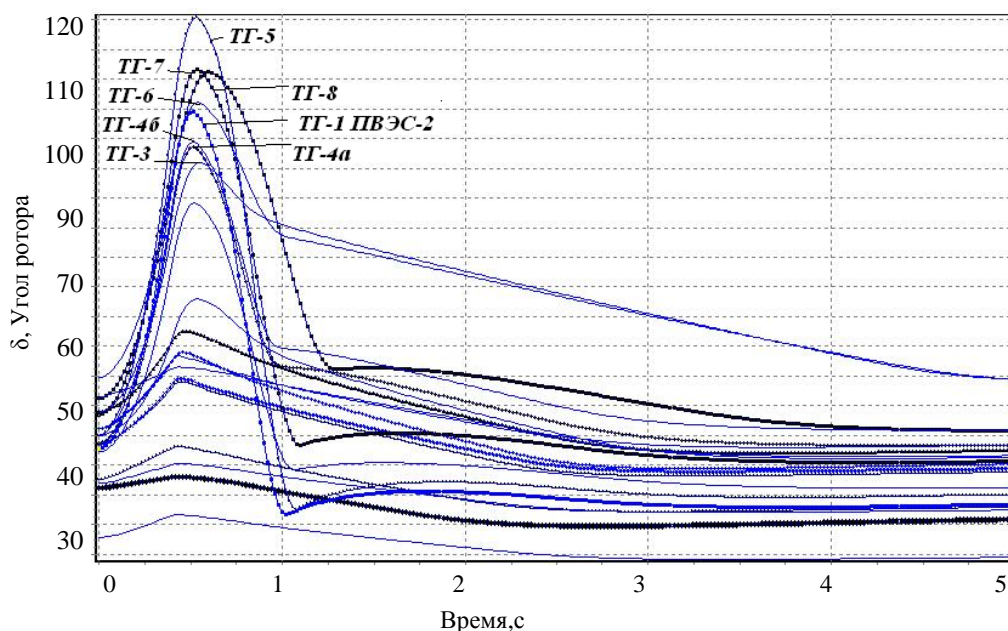


Рис. 5. Собственные углы роторов генераторов при коротком замыкании на I с.ш. РУ-110 кВ ЦЭС для $t_{\text{предел.откл.}}=0,5$ с (вариант 3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные алгоритм и программное обеспечение позволяют исследовать статическую и динамическую устойчивость промышленных синхронных генераторов при параллельной работе с электроэнергетической системой применительно к различным конфигурациям сети любой сложности, наличии большого числа собственных генераторов и нескольких точек связи с энергосистемой. Результаты расчетов дают возможность выявлять в различных эксплуатационных режимах наименее устойчивые генераторы и разрабатывать мероприятия по повышению статической и динамической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах работы. Например, изменять загрузку синхронного генератора по активной и реактивной мощности с целью снижения угла ротора генератора в установившемся режиме, а также изменять, по возможности, положение отпаек трансформаторов связи с энергосистемой с целью изменения напряжения сети и, как следствие, повышения статической устойчивости генераторов. Кроме того, появляется возможность определять наилучшую по динамической устойчивости конфигурацию сети. Разработанный программный комплекс может быть использован на этапе планирования нормальных, аварийных и послеаварийных режимов оперативно-диспетчерским персоналом электростанций или группами режимов электротехнических лабораторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
3. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
4. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / пер. с англ. под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980. 568 с.
5. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp 648-652.
6. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1970. 472 с.
8. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. №17(117). С.72-74.
9. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
10. Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. The Arabian Journal for Science and Engineering, vol.30, no.1B.
11. Савалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1988. 416 с.
12. Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергия, 1973. 392 с.
13. Hari Krishna D. Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator, TELKOMNIKA, vol.10, no.1, March 2012, pp. 9-16.
14. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
15. Zhang R., Xu Y., Dong Z.Y., Wong K.P. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
16. Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I.B., Abdallah H.H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. J. Electrical Systems, 2014, no.10-3, pp.276-291.
17. Анализ статической устойчивости генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // Главный энергетик. 2013. № 7. С. 17-25.
18. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // Электротехника. Электротехнология. Энергетика сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 8-10.
19. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей задачи // Главный энергетик. 2011. №3. С. 54-57.
20. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
21. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2. С.71.-75.
22. Влияние высоковольтных двигателей собственных нужд на надежность системы электроснабжения собственных нужд ТЭЦ ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, О.В. Буланова // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 96-104.
23. Исследование влияния ввода в работу перспективной воздушной линии на режимы промышленного энергетического узла / Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова, М.М. Гладышева, И.М. Галлиулин // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 4-2(23). С.35-37.
24. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. 2010. №3. С.26-31.
25. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. Electrical Engineering in Japan,

- vol. 133, no.1, 2000.
26. Xu Y., Dong Z.Y., Zhao J., Xue Y., Hill D.J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 276–286.
 27. Удалов С.Н. Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // *Известия Томского политехнического университета*. 2015. Т. 326. № 10. С. 123-134.
 28. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Юманов М.С. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. №5. С. 32-35.
 29. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol.85, no. 12, pp. 748-751.
 30. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой М.: Изд-во МЭИ, 1997. 424 с.
 31. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Н.А. Николаев, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // *Электрика*. 2010. №8. С. 24-26.
 32. Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // *Главный энергетик*. 2011. №3. С.35-39.
 33. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова, Е.А. Панова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
 34. Исследование сходимости метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения при работе раздельно с энергосистемой / О.В. Буланова, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2005. №10. С.129-134.
 35. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, В.М. Тарасов, М.А. Извольский // *Промышленная энергетика*. 2012. №10. С.12-17.
 36. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, vol.129, pp. 951-955.
 37. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2014. Т.14. №2. С. 68-79.
 38. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / Одинцов К.Э., Ротанова Ю.Н., Карандаева О.И., Мостовой С.Е., Шилиев П.В. // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. №3-1. С.192-198.
 39. Разработка методики прогнозирования отказов сложных электротехнических систем на примере электрических систем / Ю.Н. Кондрашова, М.М. Гладышева. Арт.А. Николаев, А.А. Николаев // *Технические науки: от теории к практике*. Новосибирск: НП «СибАК», 2014. №33. С.101-108.
 40. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*, 2014, pp. 1-6.

Поступила в редакцию 17 мая 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INCREASE OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF MODES OF ELECTRIC POWER PLANTS DUE TO FORECASTING OF STATIC AND DYNAMIC STABILITY AT CHANGE OF NETWORK CONFIGURATION

Ol'ga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Yuliya N. Kondrashova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Development of objects of distributed generation in industrial systems of power supply leads to the complication of the possible set of operational and emergency modes. At emergency or planned shutdown of the feeding lines or powerful transformers of internal power plants static stability of generators can decrease in relation to standard indicators. On the basis of the modified

method of a consecutive equivalent and a method of consecutive weighting the analysis algorithm of static stability of industrial generators is developed during parallel operation with a power supply system. Generator rotor angle is accepted as the parameter of weighting. This algorithm is the basis for a program complex of calculation of the set modes and the analysis of static stability

of industrial systems of power supply КАТРАН 9.0. On the basis of the modified method of a consecutive equivalent and a method of consecutive intervals, the algorithm of calculation of transition processes is developed. The developed algorithms and program complex make it possible to predict the postemergency set operation, to estimate static and dynamic stability of industrial generators and if necessary to develop the relevant activities. The analysis of static and dynamic stability of synchronous generators on the example of the system of power supply of the operating large industrial enterprise is provided. The closed system of power supply contains generators of various power and various electric remoteness from each other and power supply systems. Conclusions are drawn on the influence of a configuration of system of power supply on a stock of static stability in postemergency operation and dynamic stability at the change of the network configuration. Recommendations about the increase of static stability of the knot in the emergency operation are made. First of all, it is recommended to adjust the load of synchronous generators on active and reactive power in postemergency operation. The best network configuration on dynamic stability is defined. The developed program complex can be used at the stage of planning for normal, emergency and postemergency operation by the quick and dispatching personnel of power plants or groups of the modes of electrotechnical laboratories.

Keywords: Distributed generation, static and dynamic stability, industrial enterprise, set mode, transient regime, software, system of power supply, power line, transformer, synchronous generator.

REFERENCES

- Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh system* [Questions of Stability of Power Systems]. Moscow, Energy Publ., 1979. 456 p.
- Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh system* [Synchronous Machines and Stability of Electrical Systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 392 p.
- Anderson P. Fuad A. *Upravlenie energosistemami i ustoychivost* [Control and Stability of Power Supply Systems]. Moscow, Energy Publ., 1980. 568 p.
- Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp 648-652.
- Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
- Venikov V.A. *Perehodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient Electromechanical Phenomena in Electrical Systems]. 2-nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 472 p.
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of Dynamic Stability of Industrial Power Systems with Internal Power Stations at Separation from the Electric System as a Result of Short-circuit Failure. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2008, no.17(117), pp. 72-74. (In Russian).
- Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
- Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol.30, no.1B.
- Sovalov S.A., Semenov V.A. *Protivoavariynoe upravlenie v energosistemakh* [Antiemergency Control in Power Supply Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 416 p.
- Barzam A.B. *Sistemnaya avtomatika* [System Automatic Equipment]. Moscow, Energy Publ., 1973. 392 p.
- Harikrishna D. Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator, *TELKOMNIKA*, vol.10, no.1, March 2012, pp. 9-16.
- Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
- Zhang R., Xu Y., Dong Z.Y., Wong K.P. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
- Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I.B., Abdallah H.H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, no.10-3, pp.276-291.
- Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. Analysis of Static Stability of Synchronous Generators. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2013, no.7, pp.17-25. (In Russian).
- Achitaev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. Increase of Adjusting Ability of Generators in Power Systems with Distributed Generation. *Elektrotekhnologiya. Energetika sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Mezhvuzovskiy tsentr soдействия nauchnoy i innovatsionnoy deyatel'nosti studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoy oblasti* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists. Novosibirsk state technical university Interuniversity center of assistance of scientific and innovative activities of students and young scientists of the Novosibirsk region], Novosibirsk, 2015, pp 8-10. (In Russian).
- Malafeev A.V., Khlamova A.V., Krasnov M.I. Optimization of Loading of Generators of Power Stations of OJSC MMK Taking into Account Losses of Active Power on Distributive Network by Decomposition of the General Task. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no.3, pp. 54-57.
- Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
- Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Calculation of Response Characteristics of Synchronous and Asynchronous Motors of Industrial Enterprises for the Purpose of Analysis of Stability of Systems of Electrical Power Supply. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no.2, pp.71-75.
- Malafeev A.V., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Bulanova O.V. Influence of High-voltage Motors of Internal Needs on Reliability of System of Electrical Power Supply of Internal Needs of CHPP JSC MMK. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2009, no.17, pp.96-104.
- Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva M.M.,

- Galliulin I.M. Research of Influence of Implementation of the Perspective Air-line on Modes of the Industrial Energetic Hub. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific research journal], 2014, no.4-2(23), pp. 35-37.
24. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigor'eva M.V. Analysis of Modes of Asymmetrical Short Circuits in Complex Systems of Electrical Power Supply with Own Power Stations. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no.3, pp.26-31.
25. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no.1, 2000.
26. Xu Y., Dong Z.Y., Zhao J., Xue Y., Hill D.J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 276–286.
27. Udalov S.N., Pristup A.G., Achitaev A.A. Research of Magnetic Transmission with Variable Gear Relation in Wind Power Installation for the Purpose of Increase of Dynamic Stability. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of Tomsk polytechnical university], 2015, vol.326, no.10, pp.123-134.
28. Udalov S.N., Achitaev A.A., Yumanov M.S. Research of Operation Modes of Wind Power Installation on the Basis of Electromagnetic Transmission as a Part of Autonomous System of Electric Power Supply. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, power industry, electrotechnical industry], 2015, no.5. pp.32-35.
29. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol.85, no. 12, pp. 748-751.
30. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perehodnye protsessy v sisyemah promyshlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennye elektrodvigatel'noy nagruzkoi* [Transient Phenomena in Systems of Industrial Electric Power Supply Caused by Electromotive Loading]. Moscow, MEI Publishing House, 1997. 424 p.
31. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nikolaev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of Asynchronous Power of Synchronous Generators in Calculations of Electromechanical Transient Phenomena in Case of Asymmetrical Modes. *Elektrika* [Electrical Engineering], 2010, no.8, pp.24-26.
32. Malafeev A.V., Panova E.A. Algorithm of Calculation of Complex Asymmetrical Modes of Systems of Electric Power Supply of Industrial Enterprises. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no.3, pp.35-39.
33. Igumenshchev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoi zashchity v setyah 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the Effectiveness of Relaying Networks in Complex Systems of 110-220 kV Power Supply of Industrial Enterprises with their Own Power Plants]. Magnitogorsk, NMSTU Publ, 2011. 141 p.
34. Bulanova O.V., Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N. Research of Convergence of Method of Calculation of Set Modes of Systems of Electric Power Supply by Operation Separately with Power Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2005, no.10, pp.129-134.
35. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvol'skiy M.A. Research of Overall Performance of Dividing Automatic Equipment in System of Electric Power Supply of Industrial Enterprise of Ferrous Metallurgy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2012, no.10, pp.12-17.
36. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, vol.129, pp. 951-955.
37. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubaydullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Fault Rate Analysis of Variable-FREQUENCY Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, vol.14, no.2, pp.68-79.
38. Odintsov K.E., Rotanova Yu.N., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Shilyaev P.V. Technique to Predict Electrical Equipment Operational Remaining Life. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical science], 2010, no.3-1, pp.192-198.
39. Kondrashova Yu.N., Gladysheva M.M., Nikolaev Art.A., Nikolaev A.A. Development of Technique of Failure Prediction of Complex Electrotechnical Systems on the Example of Electrical Networks. *Tekhnicheskie nauki: ot teorii k praktike* [Technical science: from the theory to practice], 2014, no.33, pp.101-108.
40. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*, 2014, pp. 1-6.