

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКОВЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ В СЕТЯХ 110–220 КВ В УСЛОВИЯХ МАГНИТОГОРСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЗЛА

Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев*, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова
г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет

**ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»*

COMPLEX ESTIMATION OF CURRENT AND DISTANCE PROTECTION EFFICIENCY IN CONDITIONS OF MAGNITOGORSK INDUSTRIAL ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM WITH 110–220 KV NETWORKS

B.I. Zaslavets, V.A. Igumenshev, N.A. Nikolaev*, A.V. Malafeev, O.V. Bulanova, Y.N. Rotanova, E.A. Panova
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University

** Magnitogorsk Iron and Steel Works, OJSC*

Оценка защит проводится на основании обеспечения селективности, быстроты действия и чувствительности по результатам расчета электромеханического переходного процесса с учетом сохранения или нарушения устойчивости синхронных машин. Проведены расчеты для сетей Магнитогорского энергетического узла и даны практические рекомендации.

Ключевые слова: системы электроснабжения, релейная защита, электромеханические переходные процессы.

The estimation is based on relaying selectivity, operating speed and sensitivity ensuring as a result of electromechanical transients computation taking into account preservation or disturbance of synchronous machine stability. Computations in terms of Magnitogorsk industrial electric power supply system networks were carried out using the designed software tools realizing the above-mentioned methods. Practical recommendations were made.

Keywords: electric power supply systems, relay protection, electromechanical transients.

Эффективная работа устройств релейной защиты необходима для управления аварийными режимами системы электроснабжения с целью минимизации ущерба от повреждения оборудования или недовыпуска продукции, а также для предотвращения развития аварии. При оценке эффективности действия релейной защиты в сложнозамкнутых сетях крупных промышленных предприятий необходимо учитывать комплекс критериев. Прежде всего, как известно, к таким критериям относятся чувствительность релейной защиты (РЗ), селективность ее работы и быстроты действия. Требование обеспечения селективности в сложнозамкнутых сетях приводит к необходимости сравнения нескольких вариантов согласования уставок по току, времени, сопротивлению и

др. с выбором варианта, соответствующего наименьшему числу отключений на повреждение. С ростом нагрузок систем электроснабжения значения токов и напряжений при коротких замыканиях (КЗ) приближаются к их значениям в нормальных режимах. В связи с этим встает необходимость анализировать чувствительность устройств РЗ, то есть оценивать ее способность реагировать на возможные повреждения в минимальных режимах работы системы электроснабжения.

Быстроты действия защиты в сложных системах электроснабжения с местными электростанциями должно оцениваться не только по критериям отключающей способности выключателей и термической стойкости аппаратов и проводников. Не менее важным критерием является отсутствие качаний

и нарушения динамической устойчивости синхронных машин. Такой критерий, как правило, не учитывается в типовых методиках расчета уставок, однако для сетей с местными промышленными электростанциями может оказаться решающим. Однако при исследовании резервных защит и защит с относительной селективностью, а также при электрической близости к точке КЗ синхронных

машин большой мощности данным критерием пренебрегать недопустимо.

В связи с этим в настоящей статье рассмотрено применение методики оценки эффективности действия релейной защиты с учетом возможности нарушения устойчивости синхронных генераторов и двигателей. Блок-схема показана на рис. 1. Расчет электрохимического переходного процесса

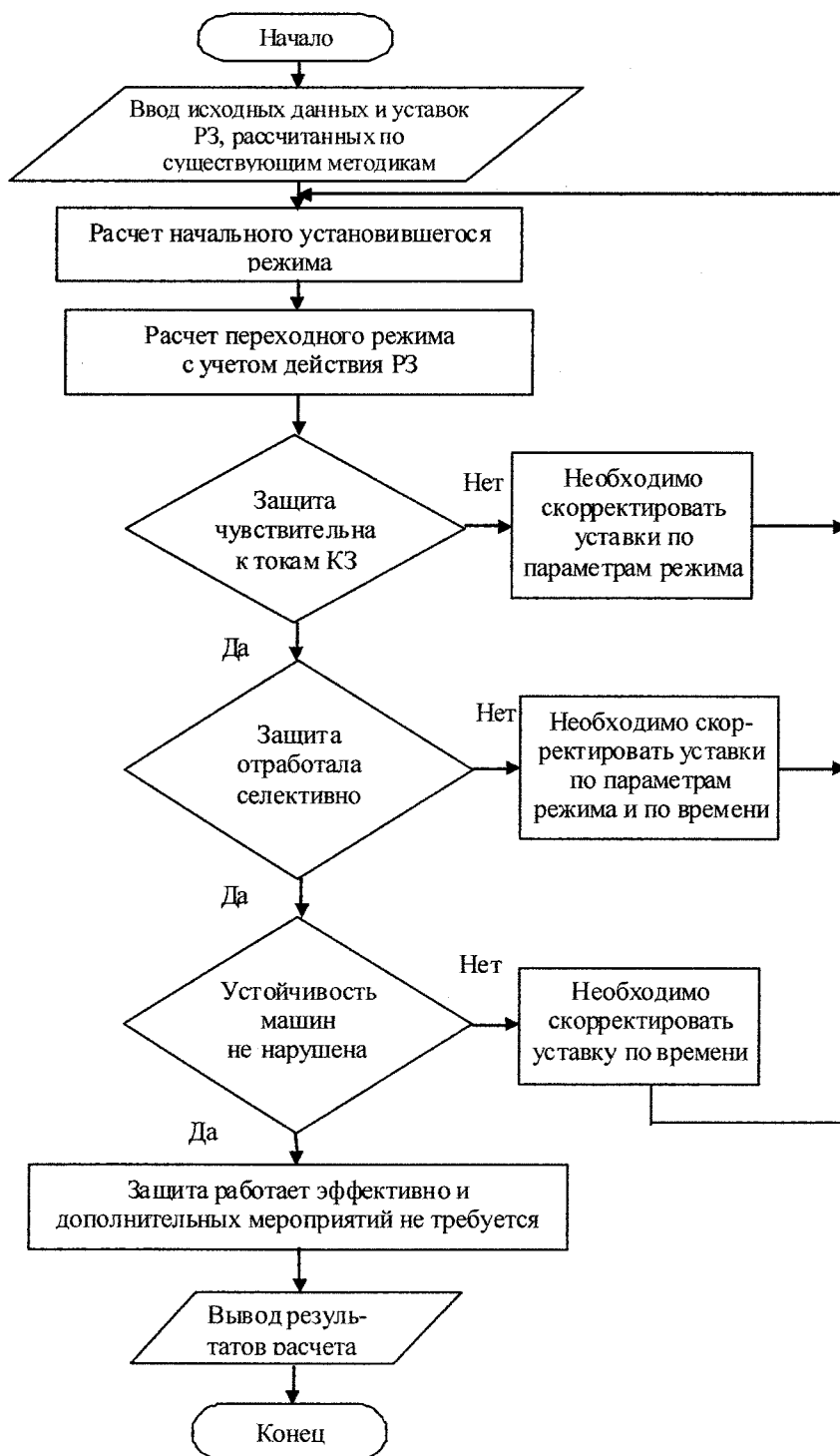


Рис. 1. Методика оценки эффективности действия релейной защиты

осуществляется при помощи программного обеспечения [1], разработанного на кафедре электрообеспечения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. В его основу положены алгоритмы расчета, подробно рассмотренные в статьях с участием авторов [2, 3]. Алгоритмы базируются на модифицированном методе последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов и методе последовательных интервалов для расчета переходных режимов.

Если релейная защита действует на отключение выключателя, то в расчетной схеме происходит соответствующее исключение связи между элементами, а расчет переходного процесса продолжается в новой расчетной схеме. При этом учитывается действие автоматических регуляторов скорости и возбуждения синхронных генераторов.

На рис. 1 к уставкам по параметрам режима также отнесены уставки измерительных органов дистанционных защит.

В ходе расчета переходного процесса при симметричном или несимметричном коротком замыкании фиксируется время и результат действия РЗ. Данная информация может быть выведена на монитор. Оценка правильности действия устройства делается по результатам анализа всей совокупности отключений, произошедших при восстановлении режима после короткого замыкания. С целью контроля параметров режима и выработки управляющих воздействий были разработаны математические модели устройств РЗ как с относительной, так и с абсолютной селективностью. Математические модели защит с относительной селективностью включают модели токовых ступенчатых защит, защит нулевой последовательности, дистанционных защит; модели защит с абсолютной селективностью включают в себя модели дифференциальных защит автотрансформаторов, дифференциально-фазных защит линий, направленных фильтровых защит линий с высокочастотной блокировкой

Сохранение устойчивости характеризуется изменением собственных углов роторов синхронных генераторов и двигателей, определяется временем отключения короткого замыкания, действием режимной автоматики и позволяет оценить принятые уставки защит и их быстродействие.

При нарушении динамической устойчивости синхронных машин наиболее действенным мероприятием является уменьшение уставки по времени отключения КЗ на рассматриваемом выключателе. Если данное мероприятие невыполнимо по условиям селективности других защит на элементе, то необходимо рассмотреть иные возможности повышения устойчивости. К ним относятся анализ быстродействия возбудителя синхронной машины, форсировки, а также закона автоматического регулирования тока возбуждения. Действие автоматических регуляторов скорости турбогенераторов,

как правило, не оказывает значительного влияния на сохранение устойчивости, если переходный процесс протекает одну-две секунды, в силу наличия зоны нечувствительности и инерционности системы регулирования. Если срабатывает резервная защита и переходный процесс длится несколько секунд и более, то действие регулятора скорости благоприятно сказывается на сохранении динамической устойчивости синхронного генератора, так как момент турбины уменьшается.

Одним из наиболее сложных объектов электроэнергетики в отечественной промышленности можно считать Магнитогорский энергетический узел (МЭУ). Реконструкция действующего производства ОАО «ММК» и сооружение новых объектов приводит к изменению конфигурации распределительных сетей, замене оборудования, расширению генерирующих мощностей, что вызывает необходимость регулярного пересмотра уставок защит. Анализ работы релейной защиты в условиях такого объекта представляет большую сложность, так как сети МЭУ имеют сложноразветвленные участки на уровне напряжения 110–220 кВ, несколько узлов связи с энергосистемой, собственные электростанции и несколько ступеней трансформации. Упрощенная схема узла приведена на рис. 2.

В схеме МЭУ основными видами РЗ с относительной селективностью линий 110–220 кВ являются: дистанционная защита (микропроцессорные комплекты ШЭ 2607 011021, панели на базе интегральных микросхем ШДЭ-2801(2), панели ЭПЗ-1636, ПЗ-159В, ПЗ-2/2), токовая ступенчатая направленная защита, токовая ступенчатая направленная защита нулевой последовательности (ТЗНП), токовая защита с ограниченной селективностью; на автотрансформаторах 220/110 кВ установлены продольная дифференциальная защита (на базе реле с магнитным торможением ДЗТ-11, на базе полупроводниковых реле ДЗТ-21, микропроцессорные комплекты ШЭ 2607 042), токовая защита обратной последовательности с приставкой при симметричных повреждениях на базе реле РМОП-1М и РМОП-2, токовая направленная ступенчатая защита нулевой последовательности (в составе микропроцессорного комплекта ШЭ 2607 071, на базе комплектов КЗ-15 с грубым и чувствительным пусковыми органами, на базе комплектов КЗ-15 обычного исполнения), дистанционная защита (в составе микропроцессорного комплекта ШЭ 2607 071, панели ПЭ-2105), ненаравленные максимальные токовые защиты (в составе микропроцессорного комплекта ШЭ 2607 071, МТЗ НН в составе комплекта ШЭ 2607 042, МТЗ НН на электрохимической базе), токовая отсечка в составе комплекта ШЭ 2607 071. На шиносоединительных (ШСВ) и секционных (СВ) выключателях установлены упрощенные комплекты токовых ненаравленных защит и ТЗНП. Защиты ШСВ вводятся только при

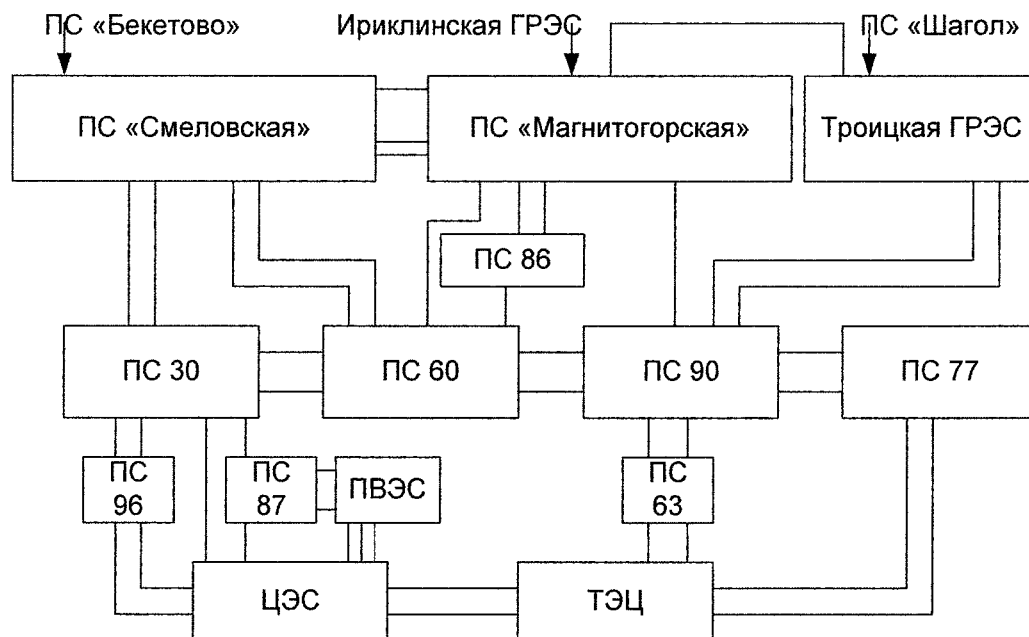


Рис. 2. Блок-схема Магнитогорского энергоузла

выводе дифференциальных защит шин или при опробовании одной из систем шин. Такое разнобразие устройств РЗ обуславливает сложность выбора параметров срабатывания с учетом всех критериев.

Наибольшую сложность представляет оценка селективности и быстродействия защит с относительной селективностью, осуществляющих ближнее и дальнее резервирование в сетях 110–220 кВ, в частности, срабатывающих при выведении быстродействующих защит. Согласование выдержек времени таких защит также является сложной задачей.

Для оценки эффективности работы РЗ рассматриваемого объекта с использованием разработанного программного обеспечения была произведена серия расчетов переходных процессов, протекающих в сети в аварийных режимах, с учетом изменения конфигурации сети в результате действия релейной защиты, а именно: расчеты переходных процессов при трехфазных коротких замыканиях в максимальном и минимальном режимах, расчеты переходных процессов при однофазных коротких замыканиях в максимальном режиме, расчеты переходных процессов при двухфазных коротких замыканиях в минимальном режиме, расчеты переходных процессов при двухфазных коротких замыканиях со стороны ВН и СН автотрансформаторов. Затем была зафиксирована последовательность пусков и отключений при каждом виде повреждений с использованием «Журнала работы РЗА», генерируемого разработанным программным обеспечением. Для анализа последовательности пусков и отключений были сняты зависимости токов от времени на выключателях соответствующих фидеров.

Рассмотрим наиболее характерный случай. При трехфазном КЗ на 1 с. ш. 110 кВ ПС-30 первым происходит отключение от 1 ступени направленной токовой защиты шиносоединительного выключателя 110 кВ на ПС-30, которое предупреждает отключение линий на 2 с. ш. 110 кВ. В следующие моменты происходит отключение от 1 ступени ненаправленной токовой защиты выключателя линии ПС-30–ПС-96 со стороны ПС-96. Далее отключается от 2 ступени дистанционной защиты ЭПЗ-1636 выключатель линии ПС-60–ПС-30 со стороны ПС-60. Затем происходит отключение от 1 ступени дистанционной защиты ПЭ-2105 выключателя ввода АТ-1 на ПС-30. После отключается выключатель линии ЦЭС–ПС-87 со стороны ЦЭС. В конце происходит отключение выключателя линии ПС-30–ПС-87 со стороны ПС-30.

Основой для анализа является журнал работы РЗ, генерируемый разработанным программным обеспечением. Для рассмотренного аварийного режима его фрагмент имеет следующий вид:

.....
0,02: Пуск МТЗ ШЭ-2607-071 на АТ2 220 60
0,02: Пуск МТЗ ШЭ-2607-071 на АТ2 110 60
0,22: Отключение от 1 ступени ненаправленной
токовой защиты 30 ШСВ 110
.....
0,24: Пуск 1 ступени ненаправленной токовой за-
щиты на 3015(1)
0,24: Пуск 1 ступени ненаправленной токовой за-
щиты на 96-30(2)
0,24: Пуск 1 ступени ненаправленной токовой за-
щиты на 96-30(3)
0,28: Отключение от 1 ступени ненаправленной
токовой защиты 96-30(2)

0,3: Пуск 1 ступени ненаправленной токовой защиты на СВ ЦЭС(1)

2,84: Отключение от 2 ступени дистанционной защиты ЭПЗ-1636 6043(1)

2,88: Отключение от 1 ступени дистанционной защиты ПЭ-2105 АТ1 220 30

3,02: Отключение от 2 ступени ненаправленной токовой защиты ЦЭС-87(1)

3,28: Пуск 1 ступени дистанционной защиты ШДЭ2802 на 30-87(2)

4: Отключение от 1 ступени дистанционной защиты ШДЭ2802 30-87(2)

Защита отработала неселективно, поскольку произошло излишнее отключение выключателя линии ЦЭС–ПС-87 со стороны ЦЭС. Этого можно было избежать путем выбора меньшего времени срабатывания защиты линии ПС-30–ПС-87 со стороны ПС-30 (меньше 0,1 с). С точки зрения оценки быстродействия отработавших защит можно сделать вывод о том, что оно не было обеспечено, так как в результате такого повреждения произошел выход из синхронизма генераторов ЦЭС, электрически наименее удаленных от точки КЗ.

Выводы о быстродействии защит по критерию сохранения динамической устойчивости генераторами сделаны на основе зависимостей угла ротора от времени, также формируемых программой (рис. 3–6).

Рис. 4, 5 соответствуют выходу из синхронизма, рис. 3, 6 – втягиванию в синхронизм.

При трехфазном КЗ на 3 секции 110 кВ ЦЭС защита работает неселективно. Происходит избыточное отключение выключателя линии ЦЭС–ПС-87 со стороны ЦЭС. Этого можно избежать путем выбора меньшего времени срабатывания защиты на секционном выключателе ЦЭС между 1 и 3

секциями шин (меньше 0,1 с). Быстродействие не обеспечивается, так как выходят из синхронизма все генераторы ЦЭС.

При трехфазном КЗ на 1 секции 110 кВ ЦЭС наблюдается полное отделение ЦЭС от энергосистемы. Этого можно избежать путем отключения шиносоединительного выключателя на ЦЭС между 1 и 2 секциями шин и секционного выключателя на ЦЭС между 1 и 3 секциями шин до срабатывания защит на линиях ЦЭС–ПС-30 через сборные шины ПС-96, при этом сохраняется параллельная работа ТГ-3 и ТГ-8 с энергосистемой.

Кроме того, неселективная работа наблюдается при трехфазных КЗ на 2 с.ш. 110 кВ ТЭЦ, 2 с. 110 кВ ПС-63, 4 с. 110 кВ ПС-63, 1 с.ш. 110 кВ ПС-60, 1 с.ш. 110 кВ ПС-96. Выход из синхронизма генераторов электростанций МЭУ наблюдается при КЗ на 1 с.ш. 110 кВ ПС-60. Основной причиной неселективной работы во всех случаях является неправильный выбор уставок по времени и выведением защит на ШСВ в нормальной эксплуатационной схеме. При однофазных КЗ имеет место неселективная работа ТЗНП в случае повреждения на 1 с.ш. 110 кВ ПС-96 (избыточное отключение СВ на РУ-110 кВ ЦЭС за счет большой выдержки времени ТЗНП линии ЦЭС–ПС-96), аналогичная ситуация наблюдается при КЗ на 1 секции 110 кВ ЦЭС.

Выводы по селективности работы защит представлены в табл. 1.

Чувствительность токовых защит оценивалась по параметрам режимов двухфазного КЗ, дистанционных – по сопротивлениям защищаемых участков. Коэффициент чувствительности токовых защит определялся как $k_{\text{ч}} = I_{\text{ф.наиб}} / I_{\text{уст}}$, дистанционных защит линий – $k_{\text{ч}} = Z_{\text{уст}} / Z_{\text{л}}$, дистанционных защит автотрансформаторов –

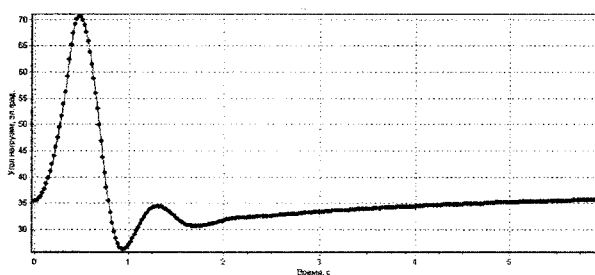


Рис. 3. ЦЭС, ТГ-3

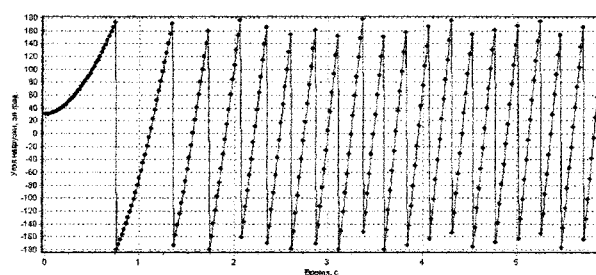


Рис. 4. ЦЭС, ТГ-4а

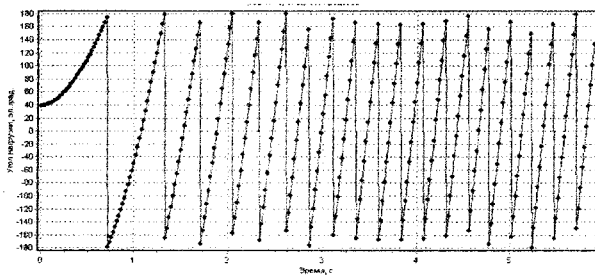


Рис. 5. ЦЭС, Г-6

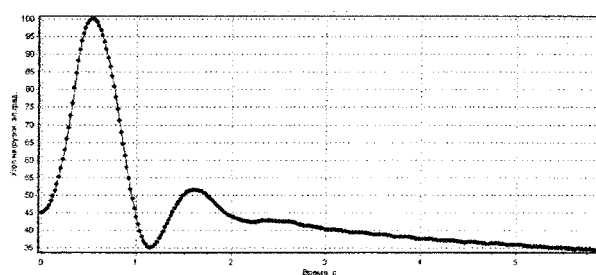


Рис. 6. ЦЭС, ТГ-7

Таблица 1

Работа защит в сетях 110–220 кВ МЭУ

КЗ	Отключившийся выключатель										Селек- тивность
	ф. 63- 107	ф. 63- 111	ф. ЦЭС- 87	ф. 30- 22	ф. 30- 14	ф. 96- 108	ф. 63- 113	ф. 60- 202	ф. ЦЭС-21	ф. 30- 22	
3ф КЗ на 1сш 110кВ ПС30			+	+		+					Нет
3ф КЗ на 3сш 110 кВ ЦЭС			+		+						Нет
3ф КЗ на 1с. 110 кВ ЦЭС			+		+				+	+	Нет
3ф КЗ на с.ш. 110 кВ ТЭЦ		+					+				Нет
3ф КЗ на 2с. 110 кВ ПС63		+									Нет
3ф КЗ на 4с. 110 кВ ПС63		+									Нет
3ф КЗ на сш 110 кВ ПС60								+			Нет
3ф КЗ на 1сш 110 кВ ПС96						+					Нет
3ф КЗ на ВЛЭП 60-30											Да
3ф КЗ на ВЛЭП 96-30					+						Да
1ф КЗ на 1сш 110 кВ ПС30						+					Да
1ф КЗ на 1сш 110 кВ ПС60											Да
1ф КЗ на 1сш 110 кВ ПС90	+										Да
1ф КЗ на 1сш 110 кВ ПС96					+						Нет
1ф КЗ на сш 110 кВ ТЭЦ	+										Да
1ф КЗ на 1сш 110 кВ ЦЭС											Нет

Примечание.

+	– правильное срабатывание защиты
+	– излишнее срабатывание защиты
	– отсутствие срабатывания защиты

$k_{\text{ч}} = Z_{\text{уст}} / Z_{\text{ВН-СН}}$, дифференциальных защит ав-

тотрансформаторов – $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р.ВН}} - I_{\text{р.СН}}}{I_{\text{уст}}}$ (здесь

$I_{\text{р.ВН}}$ – ток в плече защиты со стороны ВН, $I_{\text{р.СН}}$ – ток в плече защиты со стороны СН).

Коэффициенты чувствительности РЗ некото-
рых присоединений приведены в табл. 2.

Недостаточной чувствительностью обладает
1 ступень дистанционной защиты ШЭ 2607 линии
ЦЭС–ПС-30 ($k_{\text{ч}}=0,65$), во всех остальных случаях
коэффициенты чувствительности удовлетворяют

требованиям ПУЭ. В ряде случаев наблюдаются
чрезвычайно высокие коэффициенты чувстви-
тельности, что объясняется малой протяженностью линий и
завышенной мощностью автотрансформаторов.

Выводы

1. Анализ работы релейной защиты в сетях
МЭУ при трехфазных коротких замыканиях с ис-
пользованием разработанного программного обес-
печения показал, что как в максимальном, так и в
минимальном режимах в ряде случаев селектив-
ность работы защит не обеспечивается. Характер-
ными случаями избыточного срабатывания релей-

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности РЗ в схеме ПС-30

Точка КЗ				1 с.ш. ПС-30									
Место установки защиты				ЛЭП ЦЭС-ПС-30	ЛЭП ЦЭС-ПС-96	АТ-2 220 кВ ПС-30	АТ-2 110к В ПС-30	ШСВ ПС-30	ЛЭП ПС-96-ПС-30	ЛЭП ПС-30-ПС-87	ЛЭП ПС-96-ЦЭС	ЛЭП ПС-30-ПС-96	
Коэффициенты чувствительности	Токовые защиты		ступень	1									
				2				3,6					
				3			1,5						
	Дистанционные защиты	Линий	ступень	1	0,65	2,8			2,5	0,7	2,7	0,75	
				2	2,8	6,7			7,5	3,7	6,7	16	
				3	10,4	20			12	15,8	40	16,9	
		Авто-трансформаторов	ступень	1			2,8						
				2			11						
				3									
				4									
	Дифференциальная защита автотрансформаторов						38,3	12,48					

ной защиты являются ошибочное отключение параллельных линий и завышенное время срабатывания защит на секционных и шиносоединительных выключателях.

2. В работе проведена оценка быстродействия защит на основе анализа зависимостей углов роторов генераторов от времени в аварийных режимах. Как показали расчеты, в ряде случаев наблюдается выход из синхронизма, что говорит о недостаточном быстродействии рассматриваемых защит.

3. Результаты расчета изменения параметров режима во времени при двухфазных коротких замыканиях в минимальном режиме и полученная последовательность отключений позволили произвести расчет коэффициентов чувствительности сработавших защит. Чувствительность релейной защиты в большинстве случаев удовлетворяет требованиям ПУЭ.

4. Основными ошибками в работе защит с относительной селективностью при выводе быстродействующих защит является неселективная работа и недостаточное быстродействие.

5. На основании проделанных расчетов переходных процессов и анализа работы устройств РЗ даны практические рекомендации по измене-

нию параметров срабатывания защит в схеме МЭУ. Эффективность предложенных рекомендаций подтверждена актом внедрения. Результатами работы являются снижение затрат, связанных с простоями технологического оборудования, и снижение недовыработки электроэнергии в сети ОАО «ММК».

Литература

1. Программа «Расчет и оптимизация установившихся и переходных эксплуатационных режимов параллельной и раздельной работы с энергосистемой, режимов короткого замыкания и режимов замыкания на землю с оценкой влияния на электрооборудование в системах электроснабжения промышленных предприятий» / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, В.В. Зиновьев. Свидетельство РФ № 2008610273. – ОБПБТ. – 2008. – № 2. – С. 186.
2. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, А.В. Малафеев и др. // Промышленная энергетика. – 2008. – № 6. – С. 16–22.

3. Игуменцев, В.А. Расчет и анализ динамической устойчивости узлов нагрузки промышленных предприятий с собственными электростан-

циями / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 94–98.

Поступила в редакцию 16.09.2010 г.

Заславец Борис Иванович. Кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: b_Zaslavets@mail.ru.

Zaslavets Boris. Candidate of Science (Engineering), Professor of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: b_Zaslavets@mail.ru.

Игуменцев Валентин Алексеевич. Канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел. 8 (3519) 29-85-81.

Igumenshev Valentin. Candidate of Science (Engineering), an assistant professor of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81.

Николаев Николай Александрович. Начальник цеха электрических сетей и подстанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 24-26-28. E-mail: cetl_nikolaev@mmk.ru.

Nikolaev Nikolay. Manager of the machine shop of the electric power network and substations of Magnitogorsk Iron and Steel Works, JSC, a post-graduate student of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 24-26-28. E-mail: cetl_nikolaev@mmk.ru

Малафеев Алексей Вячеславович. Канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Malafeev Aleksey. Candidate of Science (Engineering), an assistant professor of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Буланова Ольга Викторовна. Канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Bulanova Olga. Candidate of Science (Engineering), an assistant professor of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Ротанова Юлия Николаевна. Канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 29-85-81. e-mail: rotjuil720@mail.ru.

Rotanova Yuliya. Candidate of Science (Engineering), an assistant professor of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: rotjuil720@mail.ru.

Панова Евгения Александровна. Аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск. Тел.: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: panova.ea@gmail.ru.

Panova Eugeniya. A post-graduate student of the Industrial Power Supply Department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Tel: 8 (3519) 29-85-81. E-mail: panova.ea@gmail.ru.