

10. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Koptsev L.A. *Analiz optimalnyh rezhimov raboty turbogeneratorov sobstvennyh elektrostantsij OAO "Magnitogorskij metallurgicheskij kombinat"* [Optimal Conditions Analysis of

Own Power Station Turbo - generators of JSC "MMK"]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika* [Transactions of Higher Professional Education Institutions. Electromechanics], 2011. no.4, pp. 111-114.

УДК 611.311.154

Газизова О.В., Мусин Д.А., Малафеев А.В., Жданов А.И.

СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА РАЗДЕЛЬНУЮ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ РАБОТУ

Увеличение крупными предприятиями собственных генерирующих мощностей и внедрение энергоемких электроприемников с резкопеременной нагрузкой приводит к усложнению возможных эксплуатационных режимов системы электроснабжения. Создан алгоритм поиска предельных режимов выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу по критериям соответствия параметров режима допустимым значениям. Алгоритм учитывает техническое состояние автоматических регуляторов возбуждения и скорости, а также точку подключения нагрузки в выделенной сети.

Ключевые слова: резкопеременная нагрузка, промышленное предприятие, собственная электростанция, система электроснабжения, раздельная работа, предельный небаланс мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергоемкой металлургической отрасли является одним из приоритетных направлений отечественной промышленности. Оно связано с совершенствованием и усложнением технологических переделов крупных промышленных предприятий и сопровождается вводом в эксплуатацию энергоемких потребителей с резкопеременным характером электропотребления, использованием на прокатных станах энергоемких выпрямительных агрегатов, расширением собственных электростанций предприятия с различными видами первичных двигателей, а также усложнением конфигурации электрической сети. В таких условиях неизбежно влияние узлов резкопеременной нагрузки на работу электрически близко расположенных синхронных генераторов местных электростанций.

В связи с этим появляется необходимость планирования эксплуатационных переходных режимов промышленных систем электроснабжения, сопровождающихся работой электрических нагрузок резкопеременного характера. Это невозможно без специализированного программного обеспечения, ориентированного на систему электроснабжения крупного промышленного предприятия, имеющего собственные электростанции и резкопеременную нагрузку. Как показал анализ существующего программного обеспечения, программные комплексы расчета режимов электроэнергетических систем ориентированы на крупные энергосистемы и не учитывают особенностей работы промышленных систем электроснабжения [5].

Особенно утяжеляет такие переходные процессы выход электростанции с нагрузкой на раздельную работу с энергосистемой в результате срабатывания релейной защиты или противоаварийной автоматики. Управление подобными режимами явля-

ется задачей диспетчерского персонала электростанций и электрических сетей крупного промышленного предприятия.

МЕТОДИКИ

С целью создания алгоритма поиска предельных режимов выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу с резкопеременной нагрузкой предварительно были разработаны математические модели собственных источников электроэнергии промышленных предприятий, а также характерных электроприемников, в том числе и с резкопеременным характером потребления электрической энергии.

Разработанный алгоритм основан на сочетании метода последовательных интервалов и метода последовательного эквивалентирования [6] и требует задания генераторов в схему замещения переходными ЭДС E' за фазовыми углами δ' , определяемыми в ходе численного решения дифференциального уравнения движения ротора. Угол представляет собой фазовый сдвиг между векторами переходной ЭДС E' и напряжением \dot{U} и определяется на каждом шаге интегрирования.

В данном алгоритме (рис. 1), после моделирования узла и выбора точки присоединения дополнительной мощности, прежде всего, выполняется расчет установившегося доаварийного режима и определяются нормальные и переходные ЭДС синхронных машин. Вынужденная ЭДС определяется действием системы возбуждения и в первый момент времени равна ЭДС машины E_q по поперечной оси. При расчете режима действие АРВ и форсировки моделируется изменением вынужденной ЭДС E_{qe} на каждом шаге расчета. На каждом интервале рассчитывается сверхпереходный режим, определяются приращения углов роторов и приращения переходных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №НК 14-07-00200\14.

ЭДС. Использование в подобных расчетах переходных ЭДС связано с тем, что изменения напряжения в узлах, как правило, невелики и не превышают 10 % от номинального значения.

После расчета установившегося режима производится расчет переходного режима при выходе узла на раздельную работу методом последовательных интервалов с учетом резкопеременной нагрузки и действия автоматических регуляторов возбуждения и скорости. По результатам расчета последовательно проверяется сохранение динамической устойчивости каждого генератора относительно других генераторов. Признаком нарушения динамической устойчивости является монотонное расхождение взаимных углов генераторов. Если динамическая устойчивость сохранилась, то с использованием метода последовательного утяжеления происходит увеличение дополнительной присоединенной нагрузки с определенным шагом.

Метод последовательного утяжеления включает этапы: расчет заведомо устойчивого режима выхода на раздельную работу; вычисление для данного режима значения критерия устойчивости; изменение параметров в соответствии с выбранным законом утяжеления и расчет нового переходного режима. Утяжеление продолжается до тех пор, пока на определенном шаге не произойдет изменение знака критерия устойчивости. Расчет последовательно утяжеляемых режимов требует больших затрат времени ЭВМ. Преимущества методов дискретного утяжеления состоит в простоте реализации и возможности изменения параметров утяжеления на любом шаге процесса. Это позволяет учитывать действия противоаварийной автоматики, технические и эксплуатационные ограничения. К недостаткам данных методов относится значительная трудоемкость.

Следующим шагом является изменение точки присоединения дополнительной нагрузки и повторение расчета до нахождения критического небаланса. Результатом расчета является значение критического небаланса мощности на всех рассматриваемых уровнях напряжения. Методы, заложенные в основу программного комплекса «КАТРАН», позволили разработать вышеуказанный алгоритм определения критического небаланса мощности при выходе на раздельную работу, который может быть использован для анализа режимов в службах диспетчерского управления крупных промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции.

Исследования проводились на примере самой крупной электростанции Магнитогорского энергетического узла – ТЭЦ, главная электрическая схема которой является комбинированной и содержит неблочную (ТГ-2,3) и блочную части (ТГ-1,4,5,6). Ее особенностью является выдача электроэнергии на различных уровнях напряжения от 3 до 110 кВ.

От ТЭЦ с шин 110, 35, 10 кВ получают питание ряд крупных потребителей, в том числе с резкопеременной нагрузкой (ЛПЦ-9, АПК-1,2 ЭСПЦ). На

ЛПЦ-9 нагрузка на валу двигателя, приводящего вал прокатного стана, имеет резкопеременный ударный характер, что приводит к возникновению переходных электромеханических процессов. Данные переходные процессы негативно сказываются на качестве электроэнергии и прокатываемого металла. При выходе узла на раздельную работу с энергосистемой данные потребители оказывают существенной влияние на устойчивость узла.

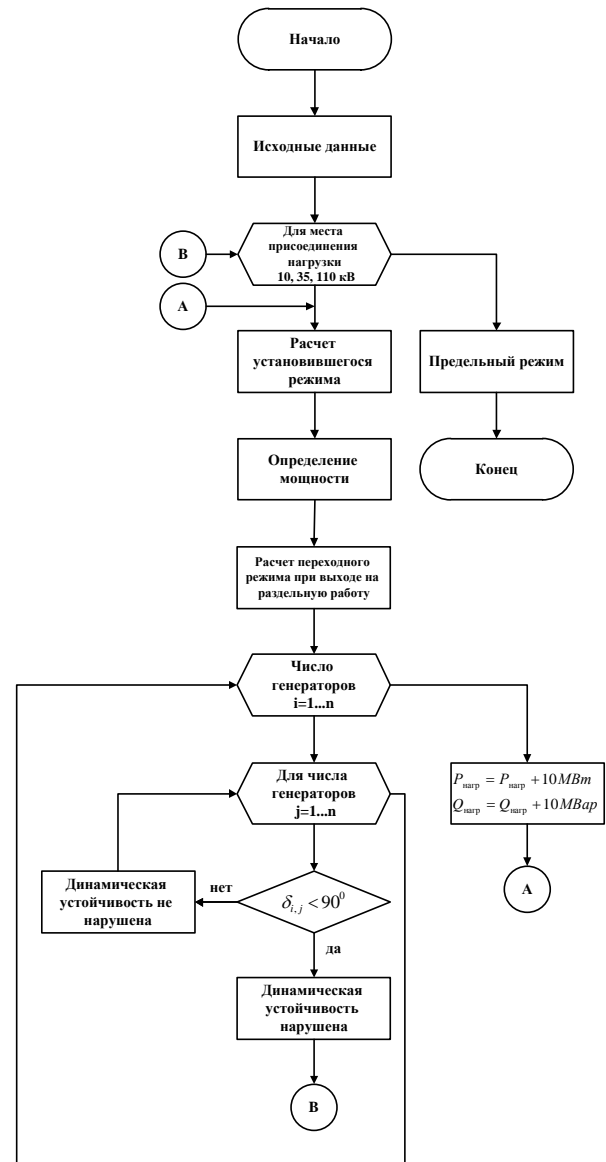


Рис. 1. Алгоритм определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленных электростанций с резкопеременной нагрузкой

На рис. 2 показана однолинейная схема ТЭЦ ОАО «ММК» в программном комплексе «КАТРАН». В исследуемой модели крупные потребители, такие как АПК 1,2 ЭСПЦ и ЛПЦ-9, были заданы обобщенными резкопеременными нагрузками. Графики изменения мощности со временем усреднения равным одной секунде, были сняты экспериментально.

На рис. 3 в качестве примера приведен график изменения реактивной мощности отходящей линии ТЭЦ на ЛПЦ-9. Электроприемники со спокойной нагрузкой были заданы в модели обобщенными нагрузками. Величины потребляемой мощности электроприемников со спокойной нагрузкой и вырабатываемой мощности генераторов ТЭЦ были приняты из эксплуатационных данных.

Характер изменения потребляемой нагрузки резкопеременный и имеют место как резкие набросы, так и резкие снижения потребляемой активной и реактивной мощности. Величина наброса мощности достигает:

- ЭСПЦ – 45 МВт и 3 Мвар;
- ЛПЦ-9 – 25 МВт и 20 Мвар.

В работе была исследована эта схема при различных условиях с применением алгоритма определения критического небаланса мощности $P_{неб}$, $Q_{неб}$ при выходе узла на раздельную работу. В ходе исследования к шинам ТЭЦ подключалась дополнительная обобщенная нагрузка $P_{доп}$, $Q_{доп}$ с последовательным утяжелением 10 МВт активной и 10 Мвар реактивной мощности до определения критических значений, при подключении которых происходило нарушение динамической устойчивости.

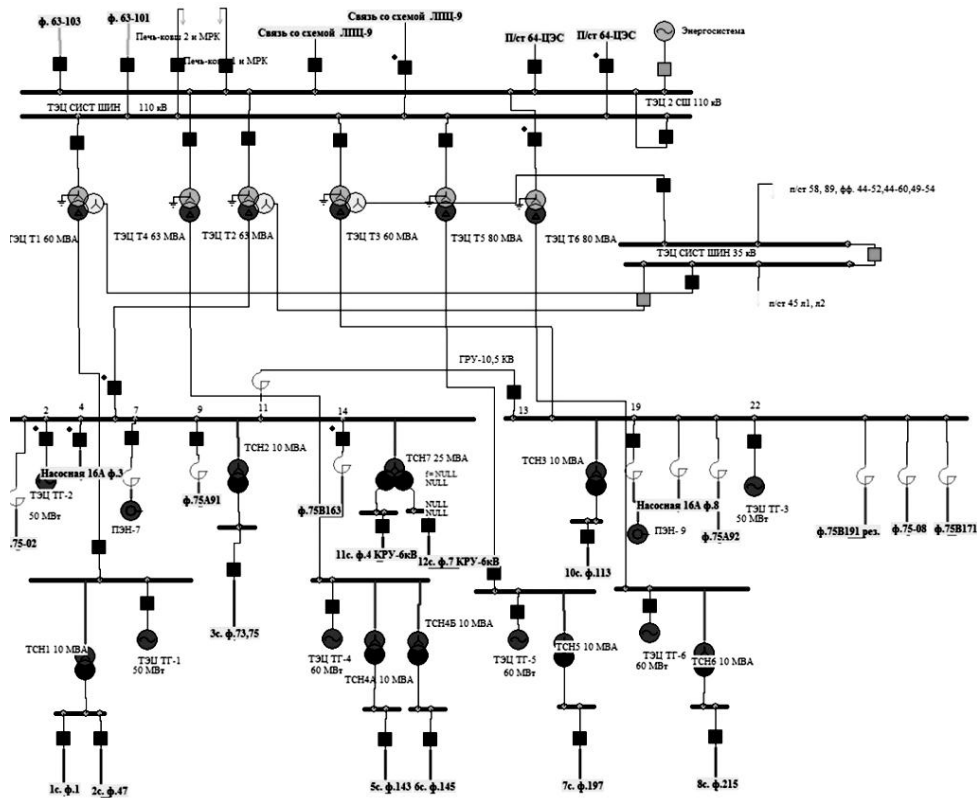


Рис. 2. Однолинейная схема ТЭЦ ОАО «ММК»

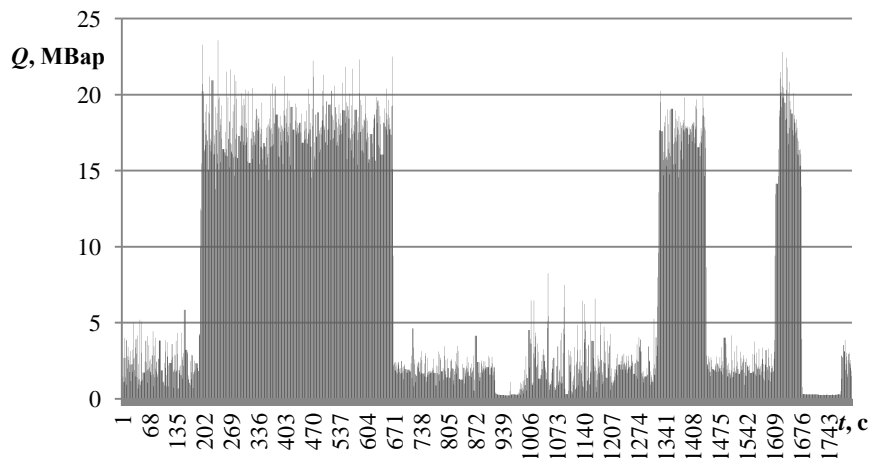


Рис. 3. График изменения реактивной мощности ЛЭП-2 ПС16, ЛПЦ-9

Далее расчет повторялся при подключении дополнительной нагрузки к шинам 35, 110 кВ. На каждом этапе утяжеления получены графические зависимости изменения параметров узла. Так, на **рис. 4** приведены взаимные углы генераторов ТЭЦ при выходе на раздельную работу без учета резкопеременной нагрузки, на **рис. 5** – взаимные углы генераторов при нарушении устойчивости в случае присоединения дополнительной нагрузки $P_{доб}=70$ МВт на шины электростанции $U=110$ кВ. При исследовании были получены следующие значения дополнительной присоединяемой мощности, при которой сохраняется динамическая устойчивость при выходе на раздельную работу: 10 кВ – 60 МВт; 35 кВ – 80 МВт; 110 кВ – 60 МВт. Дополнительная присоединяемая к ЗРУ 35 кВ нагрузка имеет большее по сравнению с остальными уровнями напряжения значение. Это связано с тем, что секции шин 10 и 110 кВ в большей степени электрически удалены от генераторов.

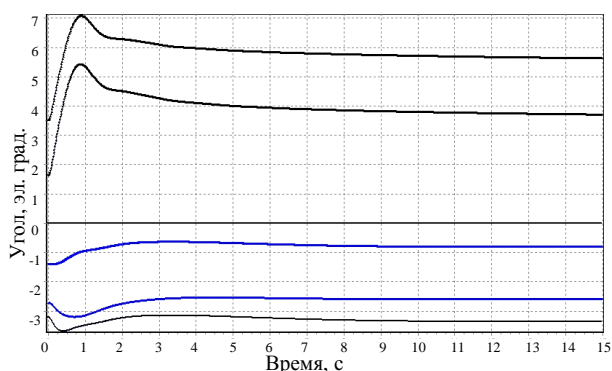


Рис. 4. Взаимные углы генераторов ТЭЦ при выходе на раздельную работу без учета резкопеременной нагрузки

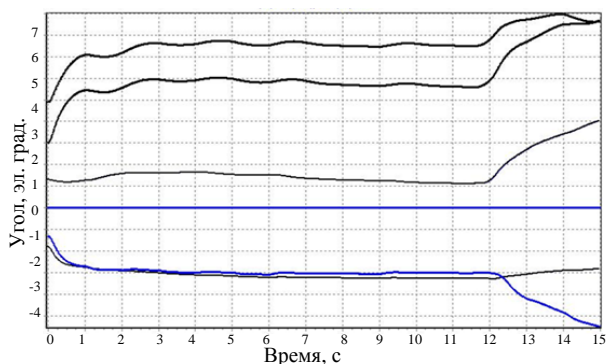


Рис. 5. Взаимные углы генераторов (нарушение устойчивости $U=110$ кВ, $P_{доб}=70$ МВт)

Таким образом, с использованием метода последовательного утяжеления были определены предельные небалансы мощностей при выходе узла на раздельную работу. Величина дополнительной присоединенной нагрузки к шинам ЗРУ 35 кВ при выходе узла на раздельную работу имеет максимальное значение. Повышение дополнительной активной нагрузки оказывает влияние на изменение углов роторов, а повышение реактивной влияет в основ-

ном на уровень напряжения. Узел ТЭЦ может быть загружен дополнительно до 60 МВт по активной и до 70 Мвар по реактивной мощности с сохранением динамической устойчивости при выходе на раздельную работу с энергосистемой при изменении частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании был проведен расчет с использованием алгоритма определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленных электростанций с резкопеременной нагрузкой (см. **табл. 1**). При исследовании получили следующие значения дополнительной присоединяемой мощности, при которой сохраняется динамическая устойчивость при выходе на раздельную работу: на шинах 10 кВ – 60 МВт; на шинах 35 кВ – 80 МВт; на шинах 110 кВ – 60 МВт. Дополнительная присоединяемая к ЗРУ 35 кВ нагрузка имеет большее по сравнению с остальными уровнями напряжения значение, так как секции шин 10 кВ и 110 кВ наиболее электрически удалены от генераторов. Повышение дополнительной активной нагрузки оказывает существенное влияние на изменение углов роторов, а повышение реактивной влияет преимущественно на уровень напряжения. Узел ТЭЦ может быть загружен дополнительно до 60 МВт по активной и до 70 Мвар по реактивной мощности с сохранением динамической устойчивости при выходе на раздельную работу с энергосистемой. Разработанный алгоритм может быть применен в условиях промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнерг. специальностей вузов. М.: Выс. шк., 1985. 536 с.
2. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
4. Мамиконянц Л.Г., Горбунова Л.М., Гуревич Ю.Е. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. М.: Гл. тех. упр-е по эксплуатации энергосистем, 1977. 127 с.
5. Мусин Д.А., Газизова О.В., Малафеев А.В., Мисунин Д.А. Разработка алгоритма определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленной электростанции с резкопеременной нагрузкой // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г.П. Корнилова, Е.А. Пановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 204-210.
6. Газизова О.В., Малафеев А.В., Тарасов В.М., Извольский М.А. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии, // Промышленная энергетика. 2012. №10. С. 12–17.

Сводная таблица предельных небалансов мощностей узла ТЭЦ ОАО «ММК» при выходе на раздельную работу

Присоединение дополнительной нагрузки на шинах 10 кВ											
активной				активной и реактивной				реактивной			
$P_{доп}$, МВт	$P_{неб}$, МВт	$Q_{неб}$, Мвар	Сохранение устойчивости	$P_{доп}$, МВт	$P_{неб}$, МВт	$Q_{неб}$, Мвар	Сохранение устойчивости	$Q_{доп}$, Мвар	$P_{неб}$, МВт	$Q_{неб}$, Мвар	Сохранение устойчивости
10	-29,01	-18,23	+	10	-30,30	-9,11	+	10	-40,99	-8,97	+
20	-17,95	-18,01	+	20	-21,27	-0,36	+	20	-41,77	-0,28	+
30	-6,97	-17,47	+	30	-12,93	8,14	+	30	-42,50	7,98	+
40	3,09	-16,61	+	40	-5,22	16,39	+	40	-43,17	15,85	+
50	14,66	-15,45	+	50	1,91	24,40	+	50	-43,79	23,37	+
60	25,29	-14,0	+	60	8,53	32,17	+	60	-44,37	30,56	+
70	35,76	-12,27	-	70	14,69	39,73	-	70	-44,91	37,46	+
80	46,07	-10,26	-	80	20,42	47,07	-	80	-45,41	44,09	+
90	56,2	-8,0	-	90	25,76	54,21	-	90	-45,88	50,47	-
35 кВ											
10	-30,51	-17,83	+	10	-32,38	-10,19	+	10	-41,32	-10,32	+
20	-21,06	-17,06	+	20	-25,76	-2,72	+	20	-42,34	-3,35	+
30	-11,82	-15,85	+	30	-20,08	4,31	+	30	-43,24	3,11	+
40	-2,85	-14,22	+	40	-15,17	10,93	+	40	-44,03	9,07	+
50	5,81	-12,21	+	50	-10,90	17,19	+	50	-44,73	14,61	+
60	14,14	-9,86	+	60	-7,17	23,12	+	60	-45,37	19,78	+
70	22,12	-7,2	+	70	-3,89	28,75	+	70	-45,94	24,64	+
80	29,72	-4,27	+	80	-0,99	34,12	-	80	-46,46	29,21	+
90	36,94	-1,1	-	90	1,57	39,23	-	90	-46,93	33,64	+
100	43,77	2,27	-	100	3,85	44,12	-	100	-47,36	37,64	-
110 кВ											
10	-28,73	-18,11	+	10	-28,73	-6,69	+	10	-40,16	-6,69	+
20	-17,30	-18,11	+	20	-17,30	4,74	+	20	-40,16	4,74	+
30	-5,88	-18,11	+	30	-5,88	16,17	+	30	-40,16	16,17	+
40	5,55	-18,11	+	40	5,55	27,59	+	40	-40,16	27,59	+
50	16,98	-18,11	+	50	16,98	39,02	+	50	-40,16	39,02	+
60	28,40	-18,11	+	60	28,40	50,45	+	60	-40,16	50,45	+
70	39,83	-18,11	-	70	39,83	61,87	+	70	-40,16	61,87	+
80	51,26	-18,11	-	80	51,26	73,30	-	80	-40,16	73,30	-
90	62,68	-18,11	-	90	62,68	84,73	-	90	-40,16	84,73	-

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF SEARCH ALGORITHM FOR LIMIT LOAD SEPARATE OPERATION OF POWER STATION AND POWER SUPPLY SYSTEM

Gazizova O.V., Musin D.A., Malafeev A.V., Zhdanov A.I.

The increase of internal generating capacities at large enterprises and introduction of power-intensive electric receivers with variable loading leads to complication of possible operating modes of the power supply system. The search algorithm for limit load separate operation of a power plant and a power supply system by compliance of operating parameters with admissible values was developed. The algorithm takes into account technical condition of automatic field and speed controllers and the point of load connection to the allocated network.

Keywords: variable loading, industrial enterprise, internal power plant, power supply system, separate work, limiting power disbalance.

REFERENCES

1. Venikov V.A. *Perehodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemah* [Transitional electromechanical processes in electric systems]: textbook for electric power faculties of universities. Moscow: Higher school, 1985. 536 p.
2. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Hachatryan E.A. *Ustoichivost nagruzki elektricheskikh sistem* [Load stability of electric systems]. Moscow: Energoizdat, 1981. 208 p.
3. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoichivosti elektricheskikh sistem* [Problems of stability in electric systems]. Moscow: Energy, 1979. 456 p.
4. Mamikonyants L.G., Gorbunova L.M., Gurevich Yu.E. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ustoichivosti*

energосystem [Guidelines for determination of stability in power supply systems]. Moscow: Main technical division on operation of power supply systems, 1977. 127 p.

5. Musin D.A., Gazizova O.V., Malafeev A.V., Misulin D.A. *Razrabotka algoritma opredeleniya predelnyh nebalansov moschnosti pri vyhode na razdelnyuyu rabotu promyshlennoi elektrostantsii s rezkoperemnoi nagruzkoi* [Development of limit determination algorithm for disbalances of capacities for separate work of electric power plant and variable load]. / *Elektrotekhnicheskie komplekxy I sistemy* [Electro technical complexes and systems]. Magnitogorsk:

Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 21, pp. 204-210.

6. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvolsky M.A. *Issledovanie effektivnosti raboty delitelnoi avtomatiki v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya chernoi metallurgii* [Study of overall performance of separating automatic equipment in power supply system of industrial enterprise in the field of ferrous metallurgy]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2012, no.10, pp. 12-17.

УДК 621.311.22

Малафеев А.В., Трemasов М.А.

РАЗРАБОТКА УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МОМЕНТНО-СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

В работе предлагается уточненная методика расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса, основанная на положениях теории гидравлических машин и исследованиях в области обратимых гидромашин. Получены аналитические выражения для рабочих характеристик питательных насосов котельных установок и характеристик трубопроводной сети, учитывающие основные составляющие потерь напора, такие как потери на удар, вихреобразование и гидравлические потери. Построение моментно-скоростной характеристики осуществляется с учетом момента на гидравлические потери и потери на сухое трение. В режиме противотока применяются универсальные моментно-скоростные характеристики обратимых гидромашин. Анализ выбега асинхронного двигателя производится на основе полученной уточненной методике построения моментно-скоростной характеристики рабочего механизма методом последовательных интервалов. Разработанная методика может быть использована для выбора параметров срабатывания релейной защиты в системах собственных нужд тепловых электростанций.

Ключевые слова: собственные нужды, питательные насосы, рабочие характеристики, характеристика трубопроводной сети, моментно-скоростные характеристики, динамическая устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стабильной работы системы электроснабжения собственных нужд (СН) электростанции является приоритетной задачей поддержания электроснабжения основных приемников электрической энергии как самой электростанции (котлы, турбины, генераторы), так и цехового оборудования промышленного предприятия. Так как механизмы СН тепловых электростанций относятся к приемникам I категории по надежности электроснабжения, то быстрое восстановление их работы в послеаварийном режиме является крайне важным. Причинами аварий могут служить исчезновение напряжения на шинах СН электростанции, выход из строя обратных клапанов насосов и др. Результатом таких аварий является остановка не только одного технологического агрегата, но и всей электростанции в целом. Для обеспечения итоговой успешности самозапуска необходим правильный выбор уставок электрических защит и согласование с уставками технологических защит.

Объектом исследования является центральная электростанция (ЦЭС) ОАО «ММК», на которой установлено 8 энергетических и 2 водогрейных котла. В турбинном участке расположено 9 турбогенераторов общей мощностью 196 МВт.

Наиболее ответственными механизмами собст-

венных нужд являются питательные насосы. Их устойчивости необходимо уделять особое внимание, так как при их отказе произойдет останов большого количества технологического оборудования, установленного на станции. В качестве питательных насосов, предназначенных для подачи питательной воды в котел, используются главным образом центробежные горизонтальные насосы секционного типа с односторонним расположением рабочих колес.

Для корректного анализа переходных электро-механических процессов и динамической устойчивости двигателей СН необходимо наиболее полно учитывать свойства приводного механизма, определяющие противодействующий момент на валу двигателя. Как правило, при оценке устойчивости моментно-скоростная характеристика механизма представляется упрощенной степенной зависимостью с постоянным членом, соответствующим моменту трогания механизма. В частности, для насосов, работающих на сеть с противодавлением, часто используется кубическая зависимость. Это приводит к погрешности расчета и неприемлемо, в первую очередь, при рассмотрении работы насоса на открытый обратный клапан. Таким образом, необходимо разработать методику получения уточненной характеристики аналитическим путем на основе конструк-