

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*

Рассматривается проблема снижения отказоустойчивости частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) при нарушениях электроснабжения. Подчеркнуто, что массовое внедрение ЧРП усугубляет проблему аварийных остановок энергоагрегатов тепловых предприятий при нарушениях электроснабжения: провалах напряжения либо кратковременных (1–3 с) отключениях. Причинами этого являются снижение темпа разгона электропривода при восстановлении питающего напряжения, а также увеличение длительности перерывов в работе электродвигателей. Приведены диаграммы, характеризующие процессы при нарушении электропитания ЧРП, поясняющие данный вывод. Представлены результаты мониторинга количества и длительности провалов напряжения на секциях РУ-10 кВ районной тепловой станции, приводящих к сбою в работе ЧРП. Показано, что наибольшее количество отклонений имеет длительность от 0,2 до 0,6 с. Кроме того, нарушения по разным вводам в большинстве случаев не совпадают по времени, поэтому полного отключения потребителя не происходит. Представлены данные о количестве отключений частотно-регулируемого и нерегулируемого электроприводов дымососов котлов КВГМ-100 пиковой котельной г. Магнитогорска, зафиксированных в период с 2005 по 2013 гг. Приведен алгоритм и представлена информация о разработанной программе расчета интенсивности отказов электрооборудования. В результате выполненных расчетов определено среднее количество отключений в год, составляющее для ЧРП и нерегулируемого электропривода 8 случаев и 3 случая, соответственно. Подчеркнуто, что эти данные соответствуют результатам, полученным с применением других методик анализа, а также опубликованным другими авторами. Отмечены разработки, выполненные авторским коллективом, по созданию частотно-регулируемых электроприводов, обеспечивающих повышенную устойчивость к нарушениям электроснабжения. Обоснована целесообразность разработки ЧРП с электропитанием от двух независимых вводов.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, тепловая станция, нарушения электроснабжения, аварийные отключения, экспериментальные исследования, интенсивность, программа расчета, рекомендации.

Для современной техники, основанной на цифровых технологиях, требуется обеспечение надежного электропитания, что в настоящее время является практически невыполнимой задачей. Электроэнергетический научно-исследовательский институт (EPRI, США) провел исследование, направленное на определение качества электроэнергии в низковольтных распределительных сетях. Данное исследование показало, что 92 % нарушений качества отпускаемой потребителю электроэнергии составляют провалы: снижения напряжения с падением амплитуды до 50 % и длительностью до 0,5 с [1].

Особенности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях кратковременных нарушений электроснабжения

Проблемы электромагнитной совместимости преобразователей частоты с электропитающей сетью и повышения отказоустойчивости ЧРП при нарушениях электроснабжения являются общепризнанными и исследуются многими авторами [2–6].

Частотно-регулируемые электроприводы усугубляют проблему аварийных остановок энергоагрегатов тепловых предприятий: тепловых электростанций, районных тепловых станций (котельных) и тепловых пунктов. Преобразователи частоты (ПЧ), выпускаемые преимущественно фирм-изготовителей, построены по принципу максимального самосохранения, что оправдано высокой стоимостью оборудования. В результате, нарушения электропитания длительностью даже в несколько периодов синусоиды могут приводить к отключению электропривода.

Диаграмма изменения скорости ЧРП при кратковременном нарушении электропитания с оценкой абсолютных значений временных интервалов, приближенных к реальным, приведена на рис. 1 [7].

На оси времени указаны события в порядке их следования и примерный характер изменения частоты вращения электропривода применительно к сетевому насосу. В момент времени t_1 нарушается электропитание, что приводит к плавному снижению частоты вращения двигателя от начального

* Работа выполняется в рамках госзадания (№ 2014/80) Министерства образования и науки РФ.

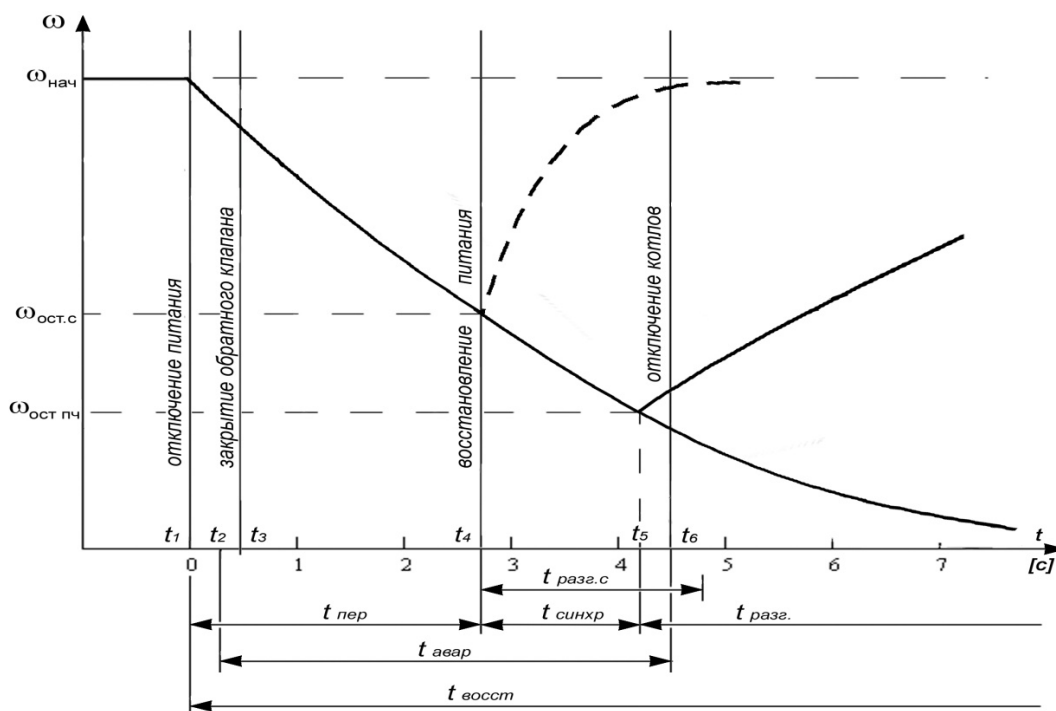


Рис. 1. Характер процесса на тепловом объекте при кратковременном нарушении электропитания и автоматическом перезапуске сетевого насоса

значения $\omega_{нач}$ и уменьшению расхода воды, перекачиваемой через котлы. В момент t_3 расход прекращается полностью в связи со срабатыванием обратного клапана на напоре насоса, а несколько раньше в момент t_2 начинается отсчет времени $t_{авар}$ аварийной защиты котлов. Если расход воды не восстанавливается до уровня уставки минимального расхода, все работающие котлы одновременно выключаются ($t_{авар}$ одинаковы для всех котлов). После перерыва $t_{пер}$ в момент времени t_4 электропитание восстанавливается, например, благодаря срабатыванию автоматического включения резерва (АВР) на секционном выключателе.

При питании электродвигателя от сети при практикующемся самозапуске (подача напряжения на еще вращающийся электродвигатель) с момента t_4 начинается его разгон (штриховая линия на рис. 2), по окончании которого ($t_{разг.с}$) расход воды восстанавливается. Общее время $t_{восст}$ составляет:

$$t_{восст} = t_{пер} + t_{разг.с}, \quad (1)$$

где $t_{разг.с}$ – время разгона электропривода с остаточной частоты вращения $\omega_{ост.с}$ при его питании от электросети.

Очевидно, что условием безостановочной работы котлов является соблюдение неравенства

$$t_{восст} < t_{авар}.$$

Процесс подхвата вращающегося двигателя при питании от ПЧ отличается от описанного самозапуска при питании от сети. В интервале времени t_4-t_5 происходит восстановление готовности преобразователя к пуску, обозначенное на рис. 2 временем синхронизации $t_{синхр}$. В случае успешного самозапуска в момент t_5 начинается разгон с

темпом, определяемым перегрузочной способностью преобразователя частоты, а для высоковольтных – практически током, не превышающим номинального значения. Суммарное время восстановления режима в отличие от (1) содержит дополнительную составляющую и большее по величине время разгона $t_{разг.пч}$:

$$t_{восст} = t_{пер} + t_{синхр} + t_{разг.пч},$$

где $t_{разг.пч}$ – время разгона, аналогичное $t_{разг.с}$, при питании электропривода от преобразователя частоты.

Кроме того, за время $t_{синхр}$ частота вращения электропривода продолжает снижаться до величины $\omega_{ост.пч}$, что еще более усугубляет проблему восстановления режима из-за увеличения необходимого времени разгона.

Нарушения электропитания на секциях РУ-10 кВ тепловой станции¹

На рис. 2, а показано распределение количества нарушений электропитания на вводе РУ-10 кВ секций 1 и 2 районной тепловой станции «Переделькино» (г. Москва) по месяцам отдельно по каждому из двух вводов. Важно, что, за исключением единственного случая, нарушения по разным вводам не совпадают по времени, то есть полностью без электропитания потребитель не остается. На рис. 2, б приведено распределение количества нарушений электропитания в зависимости от их длительности. Наибольшее их количество нахо-

¹ Материал представлен д.т.н., профессором МЭИ [Крыловым Ю.А.]

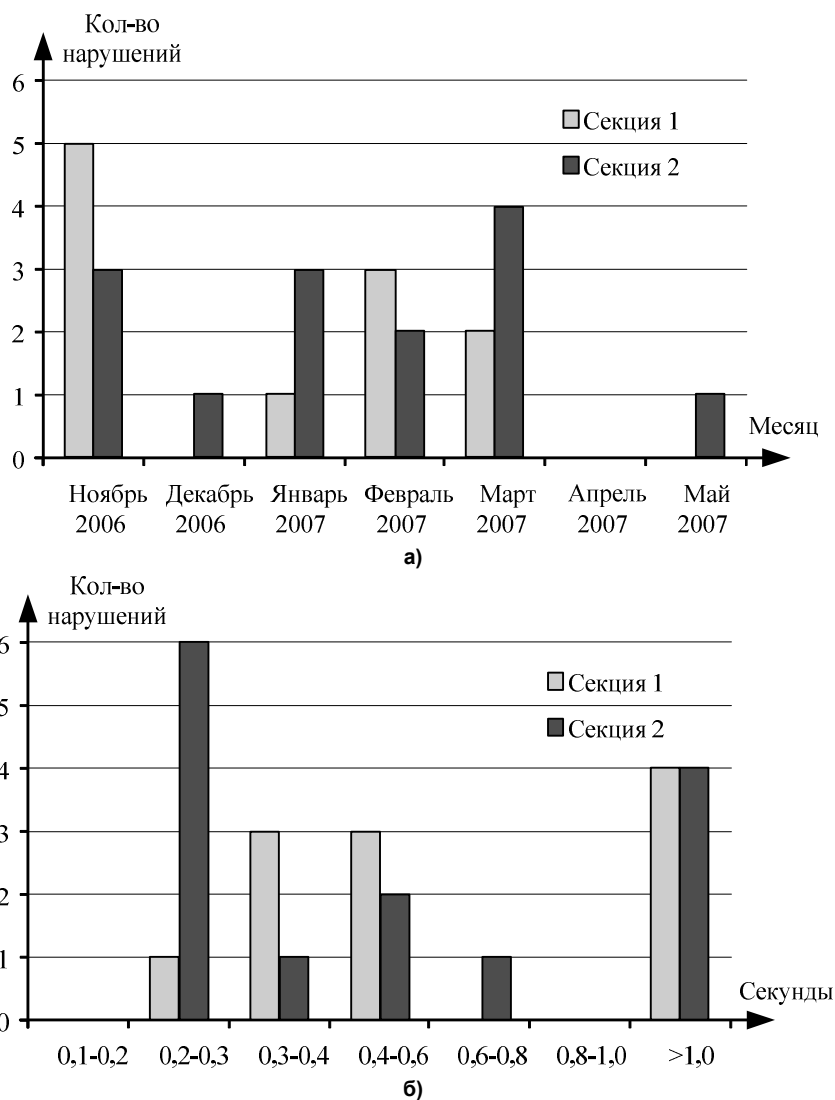


Рис. 2. Количество нарушений электропитания РТС: а – по месяцам и секциям; б – распределение в зависимости от длительности

дится в интервалах от 0,2 до 0,6 с. Это также является важной характеристикой, так как от длительности отсутствия электропитания зависят возможность автоматического перезапуска ЧРП с подхватом вращающегося электродвигателя и время восстановления технологического режима.

Общая картина нарушения электропитания представлена на рис. 3 в трех координатных осях как результат мониторинга на этой же станции двух вводов электропитания в течение года [8]. Наибольшее количество нарушений (до 8 в год) приходится на снижение напряжения на 20 % с длительностью 0,2–0,3 с, глубокие провалы или полное отключение с большей длительностью вероятны менее 1 раза в год. Каждое из таких нарушений приводит к сбою в работе частотно-регулируемого электропривода.

Проведенный анализ подтверждает актуальность создания ЧРП с электропитанием от двух независимых вводов, совпадение нарушений по которым, как показано выше, маловероятно. Дан-

ное направление обосновано в [9] и получило развитие в дальнейших разработках авторов [10, 11].

Схожесть электроснабжения тепловых предприятий различных городов по показателю его нарушений, неизбежность различных нарушений электропитания, причиной которых нередко является сам потребитель (короткие замыкания и др.), позволяет причислить рассматриваемое явление к «непреодолимым обстоятельствам». В подтверждение, в табл. 1 представлены данные о количестве отключений частотно-регулируемого (первая строка) и нерегулируемого (вторая строка) электроприводов дымососов Д-3 и Д-4 котлов КВГМ-100 № 3 и № 4 пиковой котельной г. Магнитогорска. Частотно-регулируемый электропривод дымососа Д-3 (как и электроприводы дутьевых вентиляторов указанных котлов) выполнен на базе преобразователя частоты SB-17 («Сбережок») производства НПП «Уралэлектра» г. Екатеринбург. Преобразователи частоты введены в эксплуатацию в 2005 г. и эксплуатируются по настоящее время.

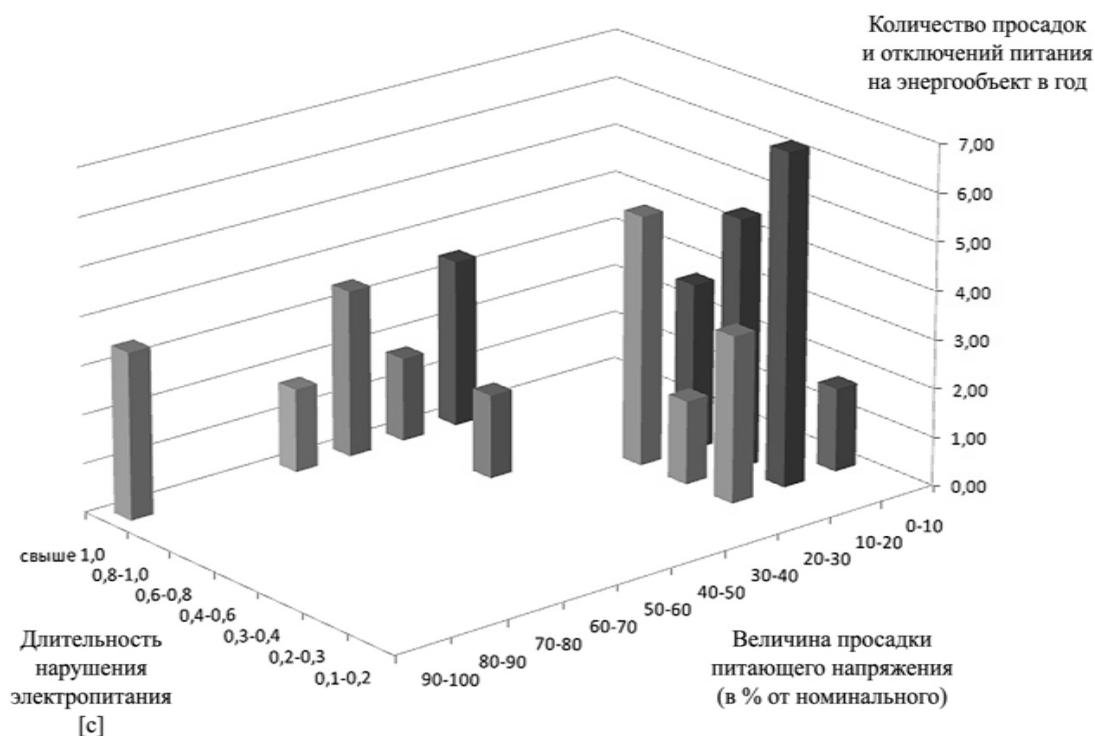


Рис. 3. Распределение кратковременных нарушений по времени и глубине провалов напряжения в высоковольтной сети

Отключения дымососов пиковой котельной г. Магнитогорска при провалах напряжения* Таблица 1

Механизм	Год									Тип электропривода
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Д-3	9	8	6	7	7	12	10	9	8	ЧРП
Д-4	3	2	1	3	2	5	4	3	4	Нерегулируемый

* Данные представлены электрослужбой пиковой котельной г. Магнитогорска.

Нерегулируемый высоковольтный электропривод дымососа Д-4 получает питание от секции РУ-6 кВ, ЧРП дымососа Д-3 питается от кабельной линии 0,4 кВ, подключенной к той же секции 6 кВ, поэтому нарушения электроснабжения в равной степени касаются обоих электроприводов. При этом количества аварийных отключений, показанные в табл. 1, для них существенно различаются. Зафиксированные провалы напряжения привели к остановкам соответствующих котлов КВГМ-100. По утверждению представителей службы эксплуатации, других инцидентов, вызванных работой ЧРП, в анализируемый период времени не отмечалось.

Программа расчета интенсивности отказов

Очевидно, что оценку технико-экономической эффективности внедрения ЧРП, достигаемой за счет энерго- и ресурсосбережения, необходимо решать в комплексе с проблемой снижения показателей отказоустойчивости, вызывающей увеличение количества и длительности простоев котлоагрегатов. С этой целью разработаны методика анализа и программа расчета интенсивности отка-

зов электрооборудования [12, 13]. В качестве основного расчетного показателя принята интенсивность отказов электроприводов как отдельных элементов оборудования теплостанции. При расчетах предполагается экспоненциальный закон распределения.

Показатели надежности элементов рассчитываются с помощью следующих соотношений:

1. Интенсивность отказов

$$\lambda_{cp} = \frac{m}{Nt_0}, \quad (2)$$

где m – количество отказов за время t_0 ; N – общее количество элементов данного наименования; t_0 – период эксплуатации, ч.

Доверительные границы для оцениваемого параметра вычисляются по формулам:

$$\lambda_{н} = \frac{\chi^2(1-\alpha_1, 2m)}{2Nt_0}, \quad (3)$$

$$\lambda_{в} = \frac{\chi^2(\alpha_2, 2m+2)}{2Nt_0}, \quad (4)$$

где индекс «н» обозначает нижнее, а «в» – верхнее значение доверительного интервала; α_1 – вероятность события $\lambda \geq \lambda_n$; α_2 – вероятность $\lambda \leq \lambda_v$; α – вероятность события $\lambda_n \leq \lambda \leq \lambda_v$, $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 - 1$; $\chi^2(s, r)$ – квантиль χ^2 распределения с параметром s и числом степеней свободы r [14]. Обычно под уровнем значимости $(1 - \alpha)$ (или вероятностью выхода оцениваемого параметра за границы доверительного интервала) подразумевают числа 0,1; 0,05; 0,01.

В случае отсутствия отказов за время наблюдения дается лишь верхняя оценка параметра

$$\lambda_v = \frac{r_0}{t_0 N}, \quad (5)$$

где r_0 – коэффициент, зависящий от уровня значимости $(1 - \alpha)$.

В простейшем случае распределение отказов (коэффициент r_0) определяется по формуле

$$r_0 = -\ln(\alpha). \quad (6)$$

2. *Вероятность безотказной работы элемента* за период времени t_0 , ч (в расчетах принималось $t_0 = 8000$ ч):

$$P(t) = \exp\{-\lambda_{cp} t_0\}. \quad (7)$$

Доверительные вероятности принимались следующими:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,95.$$

Алгоритм расчета, разработанный по зависимостям (2)–(7), представлен на рис. 4, более подробное его описание приведено в [14, 15]. На основе данного алгоритма разработана компьютерная программа «*Интенсивность отказов*» с использованием среды C++BUILDER XE. В этой программе наряду с интенсивностью отказов рассчитываются показатели надежности: среднее число отказов, вероятность безотказной работы и др., а также статистические параметры, представленные в табл. 2.

Результаты расчета

Для расчета и анализа использовались данные по отключениям дутьевых вентиляторов котлов КВГМ-100, представленные в табл. 1. На рис. 5 приведены графики изменения интенсивностей отказов (отключений), построенные по экспериментальным данным (кривые 1, 2) и в виде логарифмических зависимостей (кривые 3, 4), в функции продолжительности эксплуатации. Результаты расчета статистических параметров приведены в табл. 2.

Следует заметить, что смысл параметров, представленных в первых четырех строках таблицы, отличается от общепринятого. В данном случае они характеризуют не показатели, связанные с

износом и соответственно старением оборудования, когда в период нормальной эксплуатации, как правило, наблюдается тенденция их монотонного увеличения либо уменьшения (в зависимости от характера показателя) [16]. В данном случае термин «отказ» понимается как отключение, вызванное нарушением электроснабжения, время возникновения которого является случайной величиной.

Расчет средней интенсивности отказов показал, что для регулируемого электропривода дымососа Д-3 она равна $\lambda_{cp, Д-3} = 9,64 \cdot 10^{-4}$, что в 2,8 раза выше, чем для нерегулируемого электропривода дымососа Д-4 ($\lambda_{cp, Д-4} = 3,4 \cdot 10^{-4}$). Среднее количество отключений в год на единицу оборудования составляет 8 и 3 случая, соответственно. Такое соотношение соответствует результатам исследований, опубликованных в [17, 18], и достаточно близко совпадает с результатами, полученными при исследовании аналогичных показателей по методике, разработанной на основе логико-вероятностного метода [19, 20]. Это косвенно подтверждает достоверность результатов проведенных исследований.

Очевидно, что повышение устойчивости к провалам напряжения целесообразно обеспечивать средствами самого электропривода. При этом автоматическое включение резерва на период паузы не является рациональным решением, а создание собственного быстродействующего устройства АВР проблематично как с точки зрения усложнения схемы системы электроснабжения, так и внесения проблем по обеспечению селективности и равномерности загрузки вводов электропитания [21].

Обязательной функцией для всех регулируемых электроприводов ответственных механизмов должно быть восстановление технологического режима за несколько секунд при восстановлении электропитания. Программное обеспечение большинства современных ПЧ предусматривает эту функцию, зачастую под несколькими названиями: «пуск в лет», «Flying start», «самозапуск», «подхват» вращающегося электродвигателя. Как показывает практика, реализация этой функции при наладке конкретного электропривода достаточно сложна. Широкого опыта успешного применения функции «пуск в лет» на отечественных промышленных и тепловых предприятиях не прослеживается. Вероятно, это связано со сравнительно редкой ее востребованностью, так как перезапуск через останов удовлетворяет большинству технологий (под термином «перезапуск» понимается повторный пуск двигателя без бросков тока после провала или кратковременного отключения напряжения питания). Авторским коллективом выполняются разработки частотно-регулируемых электроприводов, обладающих повышенной устойчивостью к нарушениям электроснабжения.

Наряду с вышеназванным направлением создания ЧРП с электропитанием от двух вводов они посвящены совершенствованию режимов принуди-

тельного гашения поля [22, 23] и реализации принципа самопитания [24, 25]. Отдельные результаты исследований опубликованы в [26–29].

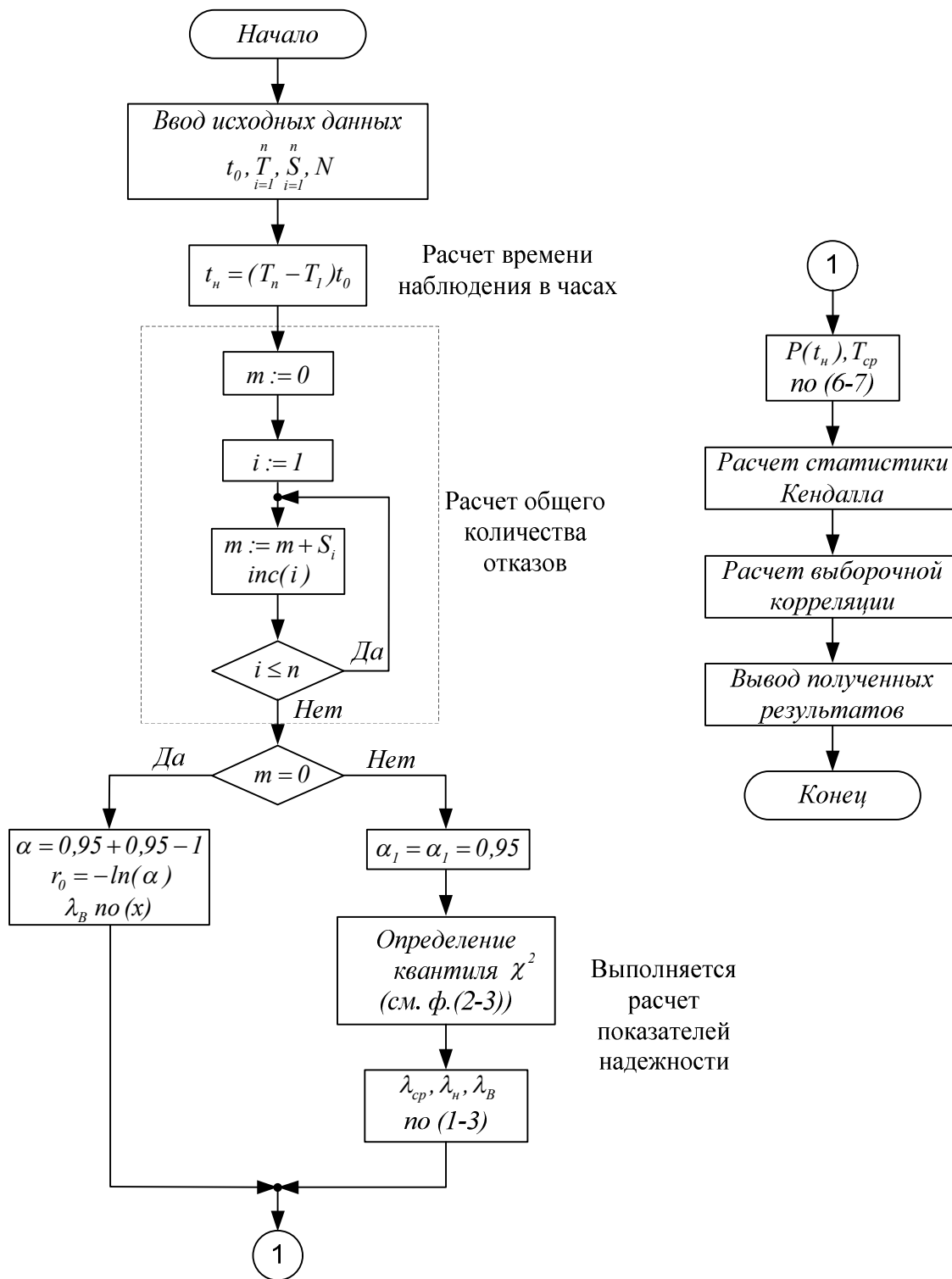


Рис. 4. Алгоритм расчета интенсивности отказов

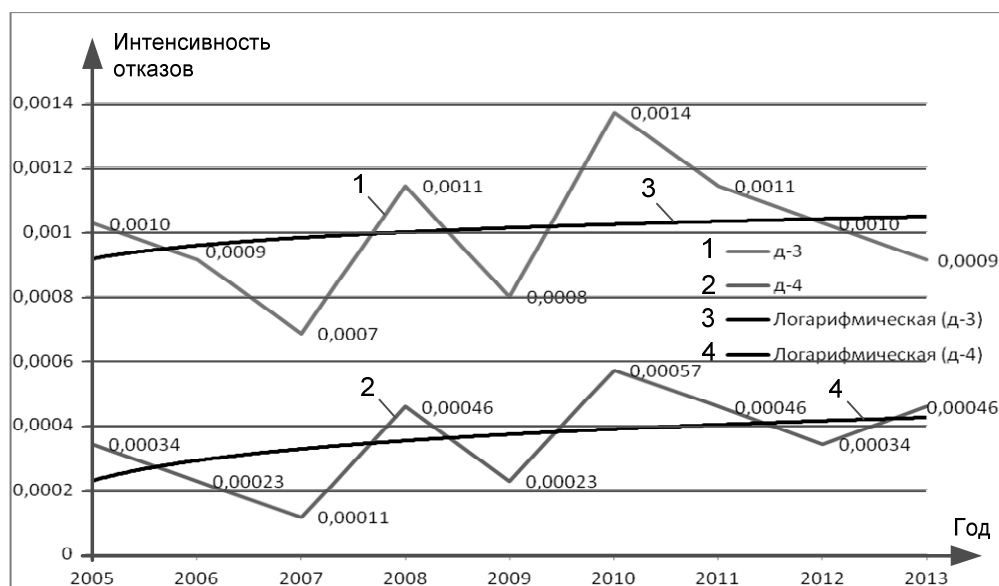


Рис. 5. Изменения интенсивности отказов регулируемого и нерегулируемого электроприводов

Таблица 2

Статистические параметры, характеризующие отключения электроприводов дымососов

Расчетный параметр	Регулируемый электропривод Д-3	Нерегулируемый электропривод Д-4
Средняя интенсивность отказов, $\lambda_{\text{ср}}$, 1/ч	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$9,64 \cdot 10^{-4}$
Наработка на отказ, $T_{\text{ср}} = 1/\lambda_{\text{ср}}$, ч	2940	1037
Среднее число отказов на единицу оборудования	76	27
Среднее число отказов в год	8	3
Табличное значение распределения Стьюдента	1,895	1,895
Квантиль нормального стандартного распределения	1,645	1,645
Коэффициент корреляции	0,303	0,559
Расчетное значение $t_{\text{расч}}$	1,840	1,784
Нижняя доверительная оценка наработки на отказ, ч	856	2117
Верхняя доверительная оценка наработки на отказ, ч	1266	4135
Нижняя граница $P_{\text{н}}$	-0,96	0,182
Верхняя граница $P_{\text{в}}$	0,801	0,936
Нижняя доверительная оценка, $\lambda_{\text{н}}$, 1/ч	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$
Верхняя доверительная оценка, $\lambda_{\text{в}}$, 1/ч	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$

Заключение

Количество отключений ответственного оборудования тепловых предприятий, оснащенного частотно-регулируемыми электроприводами, напрямую зависит от интенсивности нарушений электроснабжения и составляет, в среднем, от 3 до 8 случаев в год. При этом нарушения, возникающие на различных секциях шин одного уровня напряжения, как правило, не совпадают по времени, что положительно влияет на показатели отказоустойчивости котельных агрегатов. Данный вывод подтверждает актуальность разработки ЧРП с электропитанием от двух независимых вводов, одновременное нарушение электропитания по которым маловероятно.

В результате математической обработки экспериментальных данных, выполненной с помощью

специально разработанной программы, показано, что интенсивность аварийных отключений, вызванных нарушениями электроснабжения, для ЧРП практически в 3 раза выше, чем для нерегулируемого электропривода.

В сложившейся ситуации целесообразно проведение исследований и разработок, обеспечивающих повышение устойчивости ЧРП к провалам напряжения средствами самого электропривода. При этом известная программная функция «Flying start», реализованная во многих ЧРП зарубежных производителей, не имеет широкого применения на отечественных тепловых предприятиях. В связи с этим авторским коллективом выполняются исследования и разработки, направленные на совершенствование ЧРП с принудительным гашением поля и реализацию принципа самопитания.

Литература

1. Almeida, A.T. Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems / A.T. Almeida, F.J.T.E. Ferreira, D. Both // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 41, iss. 1. Jan.-Feb.
2. Semiconductor Converters of Electric Energy Electromagnetic and Electromechanical Processes in an Electric Drive under Frequency Converter Parallel Operation to Induction Motor / D.V. Belyaev, A.M. Veinger, G.B. Lazarev et al. // Russian Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 78, no. 5. – P. 236–242.
3. Лазарев, Г.Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций / Г.Б. Лазарев // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 33–42.
4. Тарасов, Д.В. Требования к частотно-регулируемым электроприводам насосов и вентиляторов при аварийных режимах в системе электроснабжения котельных / Д.В. Тарасов // Электрические станции. – 2006. – № 1. – С. 52–56.
5. Системы бесперебойного электропитания особо ответственных потребителей с частотно-регулируемым электроприводом / В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов, Г.П. Корнилов и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 51–53.
6. Veinger, A.M. Study of Influence of Disturbances in Symmetry of Supply Voltage on Operation of High-Voltage Controlled Drives / A.M. Veinger, V.N. Medvedev // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, no. 6. – P. 306–310.
7. Проблемы внедрения частотно-регулируемых электроприводов на ответственных механизмах тепловой электростанции / Ю.А. Крылов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 19–25.
8. Энергосбережение в теплоэнергетическом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: моногр. / Ю.А. Крылов, В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2012. – 202 с.
9. Карандаева, О.И. Повышение надежности электроприводов тепловой электростанции металлургического предприятия при внедрении преобразователей частоты: дис. ... канд. техн. наук / О.И. Карандаева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2011. – 172 с.
10. Пат. 110877 Российская Федерация, МПК H02JP 9/06. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / А.С. Карандаев, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин и др. – Опубл. 27.11.2011, БИМП № 33.
11. Пат. 120294 Российская Федерация, МПК H02M 4/40. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / А.С. Карандаев, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин и др. – Опубл. 24.04.2012, БИМП № 25.
12. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / К.Э. Одинцов, Ю.Н. Ротанова, О.И. Карандаева и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3, ч. 1. – С. 192–198.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611133 Российская Федерация. Расчет показателей надежности электрооборудования / А.С. Карандаев, Ю.Н. Кондрашова, К.Э. Одинцов, О.И. Карандаева // ОБПБТ. – 2011. – № 2. – С. 275.
14. Методика расчета остаточного ресурса систем управления и защиты электроустановок / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, К.Э. Одинцов и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 91–94.
15. Алгоритмы расчета ресурса систем управления и защиты электроустановок / И.М. Ячиков, К.Э. Одинцов, О.И. Карандаева и др. // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. ст.: в 3 т. – Самара: СамГТУ, 2011. – Т. 2. – С. 275–280.
16. Алгоритм расчета интенсивности отказов электрооборудования / К.Э. Одинцов, И.М. Ячиков, С.А. Евдокимов и др. // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – 2012. – С. 64–69.
17. Расчет надежности электроприводов при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, А.А. Шеметова, О.И. Карандаева, Г.В. Шурыгина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 59–64.
18. Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. – СПб.: Лань, 2013. – 176 с.
19. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, О.И. Карандаева и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12, № 34 (167). – С. 16–22.
20. Применение логико-вероятностного метода для анализа надежности автоматизированных электроприводов / А.С. Карандаев, А.А. Шеметова, О.И. Карандаева и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3, ч. 1. – С. 153–160.
21. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4. – С. 79–84.

22. Пат. 123270 Российская Федерация, МПК Н02Р7/08. Преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией для электроприводов ответственных механизмов / Т.Р. Храмин, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев и др. – Оубл. 20.11.2012, Бюл. № 35.

23. Пат. 112539 Российская Федерация, МПК Н02М5/415, Н02М7/525, Н02Н7/09, Н02Р7/04. Преобразователь частоты / В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов, Т.Р. Храмин и др. – Оубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

24. Пат. 125789 Российская Федерация, МПК Н02Р27/08, Н02М5/451, Н02М7/527. Преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией / Т.Р. Храмин, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев и др. – Оубл. 10.03.2013, Бюл. № 7.

25. Пат. 132279 Российская Федерация, МПК Н02Р27/00. Устройство управления двигателями переменного тока / Т.Р. Храмин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмин и др. – Оубл. 10.09.2013, Бюл. № 25.

26. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А.С. Карандаев, Р.Р. Храмин, Т.Р. Храмин и др. // Машино-

строение: сетевой электрон. науч. журн. – 2013. – № 1. – С. 12–21.

27. Крылов, Ю.А. Повышение устойчивости высоковольтного частотно-регулируемого электропривода при нарушениях электроснабжения / Ю.А. Крылов, В.Н. Медведев, А.С. Карандаев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет», 2012. – С. 161–165.

28. Медведев, В.Н. Способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных преобразователей частоты с электродвигателем и сетью / В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов // Электроприводы переменного тока: тр. четырнадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – С. 161–165.

29. Храмин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станков / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн. – 2013. – № 2. – С. 48–53.

Храмин Вадим Рифхатович, д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; hvrg_mgn@mail.ru.

Одинцов Константин Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; eltech_mgtu@mail.ru.

Андрей Рифович Губайдуллин, аспирант кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; AED174@mail.ru.

Карандаева Ольга Ивановна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; oikaran@mail.ru.

Кондрашова Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; gotjuil720@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 апреля 2014 г.

FAULT RATE ANALYSIS OF VARIABLE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVES IN DISTRICT HEATING STATIONS UNDER POWER SUPPLY VIOLATIONS

V.R. Khramshin, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, *hvr_mgn@mail.ru*,

K.E. Odintsov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, *eltech_mgtu@mail.ru*,

A.R. Gubajdullin, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, *AED174@mail.ru*,

O.I. Karandaeva, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, *oikaran@mail.ru*,

Yu.N. Kondrashova, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, *rotjuil720@mail.ru*

The article considers fail-safety decrease for variable-frequency electric drive (VFD) under power supply violations. It is noted that wide VFD introduction aggravates problem of power generating unit emergency stop in heating station under power supply violations (such as voltage sag or short-time voltage shutdowns (1–3 s)). The reasons for these shutdowns are electric drive acceleration rate decrease under power supply recovery and increase in electric drive work time pause duration. The diagrams describing the processes under VFD power supply violations are shown. The monitoring results of duration and number of voltage sags resulting in FVD failure and occurring in high-voltage switchgear sections 10 kV at a district heat generating plant are submitted. It is detailed that the duration of most deviations is 0.2–0.6 s. Besides, troubles in various inputs in most cases are not synchronized, so there is no full disconnection of a power user. The article gives the data concerning the number of variable-frequency and unregulated electric drive shutdowns of boiler KVGM-100 smoke exhauster at Magnitogorsk peak boiler plant, stated in the period of 2005–2013. The algorithm and details on the developed program of electrical equipment fault rate calculation are provided. As a result of the calculations the average number of shutdowns per year is defined, which is 8 cases per year for VFD and 3 cases for unregulated electric drives. It is noted that these data correspond to the results obtained using other analysis techniques and the results published by other authors. The article marks the research results in creation of VFD with the increased resistance to power supply violations executed by a group of author's. The expediency of designing VFD with two independent power supply inputs is proved.

Keywords: variable-frequency electric drive, heating station, power supply violations, emergency shutdown, experimental research, fault rate, program calculation, recommended guidelines.

References

1. Almeida A.T., Ferreira F.J.T.E., Both D. Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, iss. 1. Jan.-Feb. 2005.
2. Belyaev D.V., Veinger A.M., Lazarev G.B., Novakovskii A.N., Sultanov A.T. [Semiconductor Converters of Electric Energy Electromagnetic and Electromechanical Processes in an Electric Drive under Frequency Converter Parallel Operation to Induction Motor]. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, no. 5, pp. 236–242. (in Russ.)
3. Lazarev G.B. [Electromagnetic compatibility of high-voltage frequency converters with electricity supply system and heat power plant auxiliary electric drives]. *Russian Electrical Engineering*, 2004, no. 10, pp. 33–42. (in Russ.)
4. Tarasov D.V. [Requirements to variable-frequency electric drives of pumps and fans under emergency operation in boiler plant electricity supply system]. *Power Technology and Engineering*, 2006, no. 1, pp. 52–56. (in Russ.)
5. Rovnejko V.V., Galljamov R.R., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Slavgorodskij V.B. [Uninterruptible power supply systems for critical power users operating on variable-frequency electric drives]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 51–53. (in Russ.)

6. Veinger A. M., Medvedev V. N. [Study of Influence of Disturbances in Symmetry of Supply Voltage on Operation of High-Voltage Controlled Drives]. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, no. 6, pp. 306–310.
7. Krylov Ju.A., Selivanov I.A., Karandaev A.S., Gubajdullin A.R., Rovnejko V.V., Galljamov R.R. [Problems of variable-frequency electric drives introduction for thermal power station critical mechanisms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Jelektromehaniika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.)
8. Krylov Ju.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energoberezhenie v teploenergeticheskom khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Power saving in municipal heat and power facilities by means of variable-speed drive]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 202 p.
9. Karandaeva O.I. *Povyshenie nadezhnosti elektroprivodov teplovoy elektrostantsii metallurgicheskogo predpriyatiya pri vnedrenii preobrazovateley chastoty* [Increasing electric drives reliability of iron and steel company thermal power station with frequency converter introduction], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 172 p.
10. Karandaev A.S., Khrashin T.R., Khrashin R.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Rovnejko V.V., Galljamov R.R. *Preobrazovatel' chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency converter for continuous electric drive]. Patent RF, no. 110877, 2011.
11. Karandaev A.S., Khrashin T.R., Khrashin R.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Medvedev V.N. *Preobrazovatel' chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency converter for continuous electric drive]. Patent RF, no. 120294, 2012.
12. Odintsov K.E., Rotanova Ju.N., Karandaeva O.I., Mostovoj S.E., Shiljaev P.V. [Remaining lifetime prediction technique of electrical equipment in use]. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*. [Izvestia the TSU. Engineering], 2010, vol. 3, part 1, pp. 192–198. (in Russ.)
13. Karandaev A.S., Kondrashova Ju.N., Odintsov K.E., Karandaeva O.I. *Raschet pokazateley nadezhnosti elektrooborudovaniya* [Calculation of electrical equipment reliability index]. Certificate of official registration of computer programs RF, no. 2011611133, 2011.
14. Jachikov I.M., Vdovin K.N., Odintsov K.E., Karandaeva O.I., Larina T.P. [Remaining lifetime calculation procedure for control and protection systems of electrical installations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromehaniika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 91–94. (in Russ.)
15. Jachikov I.M., Odintsov K.Je., Karandaeva O.I., Mostovoj S.E., Cemoshevich S.L. [Lifetime calculation algorithms for control and protection systems of electrical installations]. *Elektroenergetika glazami molodezhi* [Electric Power Eyes of Youth]. Samara, SamSTU, 2011, vol. 2, pp. 275–280. (in Russ.)
16. Odintsov K.Je., Jachikov I.M., Evdokimov S.A., Maslov L.A., Lednov R.A. [Fault rate calculation algorithm for electrical equipment]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automated electric]. Ivanovo, 2012, pp. 64–69. (in Russ.)
17. Karandaev A.S., Shemetova A.A., Karandaeva O.I., Shurygina G.V. [Electric drive reliability index calculation with frequency converter introduction]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromehaniika* [Sci. Electromechanics], 2010, no. 1, pp. 59–64.
18. Krylov Ju.A., Karandaev A.S., Medvedev V.N. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya proizvodstva v teploenergeticheskom khozyaystve goroda. Chastotno-reguliruemyy elektroprivod* [Power saving and industrial automation in municipal heat and power facilities variable-frequency electric drive]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 176 p.
19. Karandaev A.S., Kornilov G.P., Karandaeva O.I., Rotanova Ju.N., Rovnejko V.V., Galljamov R.R. [Reliability analysis of thermal power station equipment with frequency converter introduction]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2009, vol. 12, no. 34 (167), pp 16–22. (in Russ.)
20. Karandaev A.S., Shemetova A.A., Karandaeva O.I., Rovnejko V.V., Galljamov R.R. [Using logical-and-probabilistic method for reliability analysis of automated electric drive]. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*. [Izvestia the TSU. Engineering], 2010, vol. 3, part 1, pp. 153–160. (in Russ.)
21. Kornilov G.P., Khrashin T.R., Karandaeva O.I., Gubajdullin A.R., Galljamov R.R. [Ways of increasing variable-frequency electric drives stability under power supply violations]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no. 4, pp. 79–84. (in Russ.)
22. Khrashin T.R., Karandaev A.S., Medvedev V.N., Khrashin R.R., Kornilov G.P. *Preobrazovatel' chastoty s shirotno-impul'snoy modulyatsiey dlya elektroprivodov otvetstvennykh mekhanizmov* [Pulse-width modulation frequency converter for electric drives of critical mechanisms]. Patent RF, no. 123270, 2012.
23. Rovnejko V.V., Galljamov R.R., Khrashin T.R., Khrashin R.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A. *Preobrazovatel' chastoty* [Frequency converter]. Patent RF, no. 112539, 2012.
24. Khrashin T.R., Karandaev A.S., Medvedev V.N., Khrashin R.R., Kornilov G.P. *Preobrazovatel' chastoty s shirotno-impul'snoy modulyatsiey* [Pulse-width modulation frequency converter]. Patent RF, no. 125789, 2013.

25. Khramshin T.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Khramshin V.R., Gubajdullin A.R., Kornilov G.P. *Ustroystvo upravleniya dvigatelyami peremennogo toka* [Control device for alternating current motor]. Patent RF, no. 132279, 2013.

26. Karandaev A.S., Khramshin R.R., Khramshin T.R., Khramshin V.R., Gubajdullin A.R. [Ways of increasing variable-frequency electric drives stability under power supply violations]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 12–21. (in Russ.)

27. Krylov Ju.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S. [Increasing stability of high-voltage variable-frequency electric drives under power supply violations]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automated electric]. Ivanovo, 2012, pp. 161–165. (in Russ.)

28. Medvedev V.N., Karandaev A.S., Evdokimov S.A. [Means of compatibility assurance for high-power frequency converters with electric drive and power supply]. *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy chetyrnadtsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [AC drives: Proceedings of the Fourteenth scientific conference]. Yekaterinburg, 2012, pp. 161–165. (in Russ.)

29. Khramshin T.R., Krubcov D.S., Kornilov G.P. [Evaluation techniques of voltage pulse-width modulation in rolling mills active rectifiers]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 48–53. (in Russ.)

Received 15 April 2014