

УДК 626.824:621.311

О.В. Крюков

АО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ГРАДИРНЯМИ

Рассмотрены особенности современных водооборотных систем охлаждения технологического оборудования на промышленных предприятиях. Предложены статистические данные по использованию промышленной оборотной воды в различных отраслях и требования к ее температуре и уровням загрязнения в соответствии с государственными нормативами. Сопоставлены технические показатели прямоточных и оборотных систем, доказывающие неоспоримые преимущества последних по энергоемкости, экономичности и отсутствию воздействия на окружающую среду. Приведены современные показатели теплотехнических процессов охлаждения воды в водооборотных системах с различными типами градирен. Проанализированы факторы, влияющие на энергоэффективность, надежность и экологичность работы водооборотных систем с вентиляторными градирнями. Представлены результаты разработки и реализации проектов комплексной автоматизации электроприводов водооборотной системы различных предприятий с жесткими требованиями по стабилизации температуры охлажденной воды. Предложена методология анализа и синтеза алгоритмов управления электроприводами вентиляторов при стохастических возмущениях технологического и метеорологического характера, действующих на оборотные системы с градирнями. Доказано, что наибольшее влияние на процесс охлаждения оказывают следующие факторы: перепад температур воды, температура и влажность окружающего воздуха, а также подача насосов. Получены результаты регрессионного анализа, моделирования и внедрения систем автоматического управления водооборотного охлаждения с вентиляторными градирнями. Приведен один из примеров реализации разработанных автоматизированных систем в горнодобывающей промышленности с подробным описанием функциональной схемы водооборота, использующей принцип экспертной системы. Представлен алгоритм программного обеспечения, который реализует работу компенсирующего инвариантного регулирования и экспертной системы, обеспечивающей мониторинг и прогноз неисправностей по законам нейронечеткой логики. Приведен реальный вид управляющего интерфейса программы.

Ключевые слова: водооборотная система, экологичность, энергосбережение, стабилизация температуры воды, регрессионный анализ, промышленное предприятие.

O.V. Kryukov

JSC «Giprogazcenter», Nizhny Novgorod, Russian Federation

INCREASE OF AN ENERGY EFFICIENCY OF WATER TURNOVER SYSTEMS OF THE ENTITIES BY OPTIMIZATION OF CONTROL OF COOLERS

Features of modern water turnover cooling systems of processing equipment on industrial enterprises are considered. Statistical data on use of industrial turnover water in various industries and requirements to its temperature and levels of pollution according to the state standard rates are offered. The technical indicators of direct-flow and turnover systems proving indisputable benefits of the last on power consumption, profitability and lack of impact on environment are compared. Modern indicators of heat technical processes of chilling of water are given in water turnover systems with various types of coolers. The factors influencing an energy efficiency, reliability and ecological compatibility of work of water turnover systems with tower coolers are analyzed. Results of development and projects implementation of complex automation of electric drives of water turnover system of various entities with strict requirements on stabilization of temperature of chilled water are provided. The methodology of the analysis and synthesis of control algorithms of electric drives of fans in case of the stochastic indignations of technological and meteorological nature operating on turnover systems with coolers is offered. It is proved that the greatest impact on process of chilling is exerted by factors of difference of water temperatures, temperature and humidity of air, and also giving of pumps. Results of the regression analysis, modeling and implementation of systems of automatic control of water turnover chilling with tower coolers are received. One of examples of sale of the developed automated systems is given in the mining industry with the detailed description of the function chart of water recirculation using the principle of expert system. The algorithm of the software which realizes work of the compensating invariant regulation and the expert system providing monitoring and the forecast of defects for laws of neuro-fuzzy logic is provided. The real type of the managing interface of the program is given.

Keywords: water turnover system, ecological compatibility, energy saving, stabilization of water temperature, regression analysis, industrial enterprise.

Анализ структур современных водооборотных систем промышленных и энергетических предприятий. Широко применяемые в промышленности водооборотные системы предназначены для подачи воды с определенными параметрами на производство в требуемых количествах и соответствующего качества [1–3]. В целом они состоят из комплекса взаимосвязанных гидротехнических сооружений – водозаборных устройств, насосных станций, водоводов, установок очистки, охладителей воды, регулирующих емкостей и разводящей сети трубопроводов [3–6]. При этом окончательное снижение температуры воды с 50 до 25–30 °С производится при помощи системы оборотной воды с вентиляторными градирнями (ВГ) [2–4]. Это обусловлено тем, что на сегодняшний день отвод низкопотенциального тепла от промышленных аппаратов с помощью ВГ – самый дешевый способ, позволяющий

экономить более 95 % свежей воды. По данным государственного учета использования воды [1–3] промышленностью Российской Федерации расходуется в год примерно 40 км³ свежей воды, что составляет половину всего водозабора из источников водоснабжения или 20 % потребности предприятий в воде. Остальной объем воды (160 км³) обеспечивается повторным использованием её после охлаждения и очистки (оборотная или циркуляционная вода).

В табл. 1 [2, 3] приведены данные об использовании оборотной воды в промышленности, требования к её температуре в летний период и наличие загрязнений. Средний водооборот в промышленности Российской Федерации на рубеже XXI века составил 78 %, причем наибольшее значение этот показатель достигает в нефтеперерабатывающей промышленности, на предприятиях черной и цветной металлургии и в нефтехимии.

Таблица 1

Данные об использовании промоборотной воды

Отрасль	Расход % воды на охлаждение	Водооборот, %	Подача наибольш, м ³ /ч	Температура воды, °С		Вид загрязнений
				горячая	охлажденная	
Теплоэнергетика	96	60	1000	35–45	25–30	–
Нефтепереработка	95	94	100	40–45	25–28	Нефтепродукты мех. примеси
Химическая	74–95	64–96	100	40–45	25–30	Органические, минеральные
Черная металлургия	75	93	300	35–45	30–35	Нефтепродукты мех. примеси
Цветная металлургия	20	91	5	35–40	25–30	То же
Целлюлозно-бумажная	7	65	1	32–35	25–27	–
Легкая	–	–	6	35–36	27–28	–

Охлаждающие системы промышленного водоснабжения могут быть прямоточными, с повторным использованием воды, оборотными и комбинированными. В соответствии со СНиП 2.04.02-84 [1] выбор системы и схемы водоснабжения следует производить на основании сопоставления возможных вариантов их осуществления с учетом особенностей объекта или группы объектов, требуемых расходов воды на различных этапах, источников водоснабжения, требований к напорам, температуре, качеству воды и обеспеченности ее подачи.

СНиП 2.04.02-84 [1] предписывает проектировать новые системы промышленного водоснабжения с оборотом воды (рис. 1).

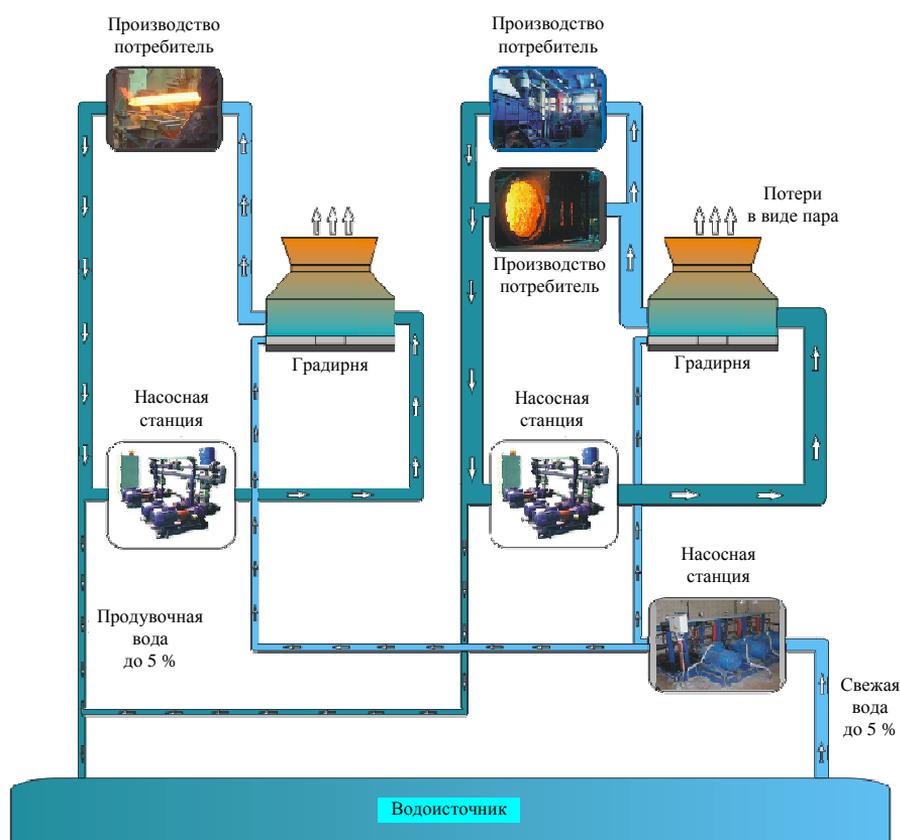


Рис. 1. Система промышленного водоснабжения с оборотом воды

По составу сооружений система оборотного водоснабжения более сложная, чем прямоточная, и с последовательным использованием воды, дороже в строительстве и эксплуатации, но позволяет резко (в 25–50 раз) снизить потребность предприятия в свежей воде

и уменьшить не менее чем в 80 раз сброс тепла в водоисточник (табл. 2). При оборотных системах тепло выбрасывается в основном в атмосферу, безвозвратный расход воды из водоисточника становится больше за счет испарения в градирнях, а её восполнение обеспечивается природными или производственными очищенными водами.

Таблица 2

Сравнительные показатели прямоточной и оборотной систем

Показатель	Система водоснабжения	
	прямоточная	оборотная
Тепловая нагрузка, ГДж/ч	2000	2000
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	50 000	50 000
Подача воды на промплощадку из источника, м ³ /ч	50 000	1500
Сброс воды в источник, м ³ /ч	49500	620
Среднегодовая температура охлаждающей воды, °С	8–14	20–25
Среднегодовая температура горячей воды, °С	18–24	30–35
Безвозвратные потери воды, м ³ /ч, в том числе на	–	1500
– испарение в градирнях	–	855
– капельный унос	–	25
Сброс тепла, ГДж/ч	2000	2000
в том числе – в водоисточник	2000	25
– в атмосферу	–	1975
– на почву	–	0,1
Относительные капиталовложения, %	100	140–175
Относительные эксплуатационные затраты, %	100	200–280

Кроме того, потребление свежей воды в промышленности может быть значительно уменьшено за счет перехода на безотходные технологии, где на первый план выступают охлаждающие системы оборотного водоснабжения с градирнями различных типов и конструкций. Для достижения еще более низкой температуры продукта применяют компрессионные или парозжекционные установки. Однако из-за большого потребления электроэнергии такими установками эта технология отвода тепла становится в 10–15 раз дороже, чем с помощью оборотной воды. Например, для отвода 4 млн кДж/ч тепла компрессионным способом затраты электроэнергии составляют 250–300 кВт·ч, а для отвода этого же тепла с помощью вентиляторных градирен затрачивается 10–15 кВт·ч.

Оборудование и теплотехнические процессы охлаждения оборотной воды в вентиляторных градирнях. Градирня – это устройство испарительного и теплообменного охлаждения воды атмосферным воздухом, которое проектируется и применяется почти во всех отраслях промышленности, но особенно велико использование градирен в энергетике, химии, нефтепереработке, металлургии, производстве полезных ископаемых и минеральных удобрений [3, 6–10]. При этом они являются центральным звеном в водооборотных системах отвода низкопотенциального тепла от промышленных аппаратов. Это обусловлено тем, что, во-первых, от технических характеристик градирен зависят возможности всей водооборотной системы предприятия и оптимизации производственного процесса [6, 11–14]. Во-вторых, конструктивные параметры градирен (вентиляторы, жалюзи и т.п.) являются фактически единственным каналом воздействия на охлаждающую способность градирни в условиях многопараметрического случайного изменения условий охлаждения от природных и технологических возмущений [3, 14].

Исторически развитие градирен связано с совершенствованием технологий охлаждения и применением новых конструкционных материалов. Сравнительные технико-экономические и экологические показатели градирен по данным [2, 3] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели градирен при охлаждении оборотной воды с $t_2 \leq 45$ °С

Показатели	Тип градирни				
	вентиляторные	башенные	открытые	эжекционные	радиаторные
<i>Технические</i>					
1. Удельная тепловая нагрузка, кВт/м ²	93–175	70–120	35–60	80–150	0,25–2
2. Температурный перепад воды, °С	3–20	5–15	5–10	5–15	5–10
3. Температура охлаждения воды, °С	16–18	21–23	26–28	18–21	30–32
4. Глубина охлаждения $t_2 - \theta$, °С	4–5	8–10	10–12	6–8	20–35
<i>Экономические</i>					
Базовые затраты в млн руб/м ² :					
– капитальные	0,3–0,8	0,7–1,1	0,3–0,7	0,7–1,1	2–3,3
– эксплуатационные	0,2–0,9	0,1–0,2	0,1–0,2	0,1–0,3	0,26–1,0

Окончание табл. 3

Показатели	Тип градирни				
	вентиляторные	башенные	открытые	эжекционные	радиаторные
<i>Экологические</i>					
Выбросы в окружающую среду к 1 м ³ воды:					
– тепла с паровым факелом, МДж/ч	12–80	20–60	20–40	60–100	20–40
– воды с капельным уносом, м ³ /ч	0,035	0,03	0,02	0,05	–
– загрязнений солями, кг/ч	0,3	0,2	0,17	0,4	–
Потребление свежей воды к 1 м ³ охлажденной воды, м ³ /ч (не более)	0,05	0,04	0,03	0,07	0,02

Самыми простыми, надежными и экономичными охладительными системами являются открытые (атмосферные) градирни или брызгальные бассейны со стационарными водораспределительными устройствами [3, 5, 6]. Они рассчитаны на давление ветра до 0,27 кПа, частичную естественную конвекцию и низкую температуру воздуха (климатические районы I–IV). Однако эффективность этого типа градирен в теплотехническом отношении очень низка, так как отсутствует охлаждение воды с подветренной стороны, имеется большая зависимость от погодных условий, метеофакторов и технологических изменений. Кроме того, данные охладители занимают большие площади с зонами экологического отчуждения и трудно подвергаются комплексной автоматизации в рамках предприятия.

Наиболее экологичными в настоящее время являются системы радиаторных (сухих) градирен, которые за рубежом применяются достаточно давно [15–18]. Однако в нашей стране такие градирни еще не нашли широкого применения из-за высокой стоимости, металлоемкости воздушных теплообменников и недооценки их преимуществ в природоохранном аспекте [19–21].

Секционные вентиляторные градирни [3, 4, 14] (рис. 2) являются наиболее распространенным типом охладительных водооборотных систем промышленных предприятий различных отраслей промышленности. Они разработаны для регионов с расчетной температурой

воздуха не ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, расчетным давлением ветра до $0,54\text{ кПа}$, нормативной снеговой нагрузкой до $1,47\text{ кПа}$. При этом нагретая до температуры $t_1 = 40...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ оборотная вода поступает в градирню через водораспределительную (оросительную) систему 3 с соплами и охлаждается в оросителях 4 до $t_2 = 25...30\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью вентилятора 1 с электроприводом. Каплеуловители 2 служат для снижения потерь от капельного уноса воды в окружающую среду. Охлаждение воды в градирнях осуществляется путем передачи тепла атмосферному воздуху за счет поверхностного испарения воды и теплоотдачи соприкосновением, т.е. процессов теплопроводности и конвекции. Испарение воды обусловлено разностью парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока, теплоотдача – разностью температур горячей воды t_1 и воздуха θ . Поэтому летом испарением отводится до 90% тепла, а зимой возрастает теплоотдача до 70% . Интенсивность охлаждения воды может регулироваться скоростью вращения вентилятора 1 и отслеживаться по показаниям датчиков.

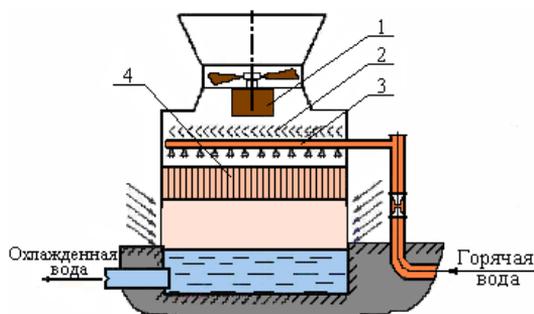


Рис. 2. Структура вентиляторной градирни

Выбор типа и конструкции ВГ производится на основе технологических расчетов с учетом заданных в проекте:

- 1) расходов оборотной воды и количества тепла, удаляемого от оборудования;
- 2) температур охлаждаемой воды и требований к стабильности охладительного эффекта;
- 3) расчетных метеорологических параметров и условий размещения на площадке завода;
- 4) химического состава оборотных вод и санитарно-гигиенических требований;
- 5) технико-экономических и экологических показателей.

Анализ стохастических возмущений, действующих на ВГ. Основой определения охлаждающей способности градирен служат данные теплогидравлических расчетов [2–6], которые производятся для наиболее тяжелых технологических и метеорологических условий работы водооборотных систем. Примерами результатов таких расчетов служат данные, представленные в [4, 5]. Как показывает анализ технических характеристик ВГ, наибольшее влияние на их охлаждающую способность и величину мощности электропривода вентилятора (при оптимальных характеристиках оросителей) оказывают две группы факторов:

- *технологические* (производительность, температуры горячей и охлажденной воды, а также гидравлическая нагрузка);
- *метеорологические* (климатические) параметры и особенности эксплуатации водооборотных систем при конкретных погодных условиях (температура, влажность воздуха, атмосферное давление, наличие, характер и направление ветра, осадков и пр.).

При этом для обеспечения требуемой температуры охлаждаемой воды номинальная мощность двигателя вентилятора должна рассчитываться, исходя из наибольших возможных значений рассмотренных параметров.

Необходимость регулирования скорости вентилятора градири объясняется требованиями поддержания постоянства температуры охлажденной воды вне зависимости от действующих возмущений параметров технологического и метеорологического характера, так как изменения t_2 приводят к ухудшению технико-экономических показателей оборудования. Наибольший эффект регулирования скорости достигается даже при скалярном управлении частотно-регулируемым асинхронным двигателем по схеме ПЧ–АД с сохранением наилучших энергетических характеристик.

Наибольшее влияние на процесс охлаждения оказывают 4 фактора:

- перепад температур воды $\Delta t = 2 \dots 12^\circ\text{C}$;
- температура окружающего воздуха $\theta = 0 \dots 35^\circ\text{C}$;
- влажность воздуха $\beta = 50 \dots 100 \%$ и подача насоса Q , м³/ч.

Поскольку скорость вращения вентилятора ω задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения

стабильной температуры охлажденной воды необходимы регрессионные многопараметрические алгоритмы линеаризованного вида [22–26]:

$$\omega_3 = f(\Delta t, \theta, \beta, Q) \quad (1)$$

и нужно скорректировать их по реальной температуре охлажденной воды t_2 [27, 28].

Инвариантное задание скорости вращения вентилятора градирни. Для реализации первых двух задач рассмотрены экспериментальные данные $\omega = f(\theta)$ и $\omega = f(\beta)$ прототипа проектируемой градирни ВГ-70СП, представленные на рис. 3.

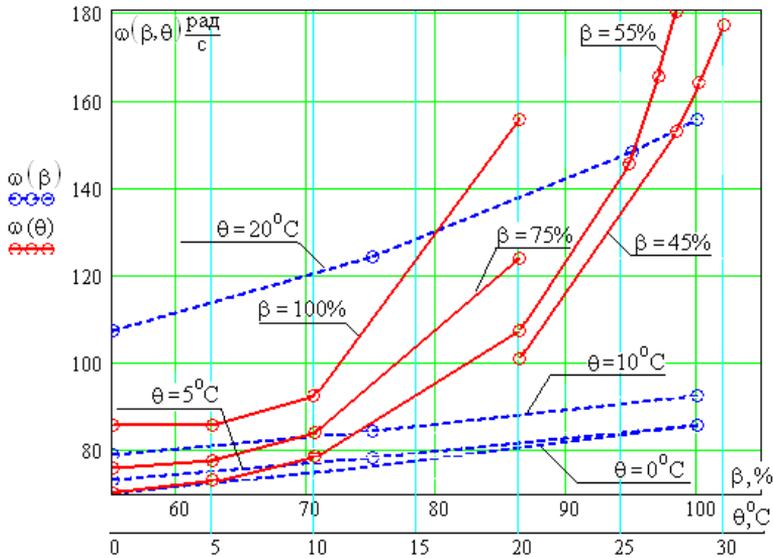


Рис. 3. Опытные данные градирни ВГ-70СП

Очевидный нелинейный и стохастический характер представленных зависимостей и аналогичный вид остальных – $\omega = f(\Delta t)$; $\omega = f(Q)$ и т.п. – предполагают применение для их обработки и формализации статистических методов, основанных на приложениях центральной теоремы теории вероятности [22, 29]. Поэтому искомые многопараметрические зависимости (1) были получены в виде нелинейных и линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов [3, 29].

По графикам данных представляем модель линейной регрессии в матричном виде:

$$y = X \cdot a + \zeta, \quad (2)$$

где y – вектор размерности $n \times 1$, содержащий n значений выходной величины ω ; X – матрица значений независимых переменных $m = 4$ ($\Delta t, \beta, \theta, Q$); a – вектор искомых данных $n \times 1$; ξ – вектор отклонений размерностью $n \times 1$.

Данный метод основан на минимизации среднеквадратичного отклонения значений регрессии от реальных экспериментальных данных. Искомый вектор параметров находится по следующей формуле [3]:

$$a = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y. \quad (3)$$

В результате обработки исходных массивов численных данных градирни с электроприводом ПЧ-АД мощностью $P_{\text{ном}} = 90$ кВт, работающего на вентилятор по закону $U/f^2 = \text{const}$, с использованием программных средств MatLab и Mathcad, получены управляющие функции в виде линейной 2-факторной и 4-факторной моделей [3, 4, 30].

Сходимость результатов моделирования для 4-факторных регрессионных моделей задания скорости вращения вентилятора градирни свидетельствует [29–34], что обе они обеспечивают достаточную точность инвариантного задания скорости во всем диапазоне изменения возмущений. Поэтому для расчёта скорости целесообразнее использовать более простые для вычислений и реализации линеаризованные уравнения.

Стабилизация температуры воды на выходе из градирни. Проведённый выше регрессионный анализ заключался в определении аналитического выражения связи, в котором изменение результативного признака (скорости вентилятора или температуры охлажденной воды) обуславливается влиянием одного или нескольких факторных признаков (основных метеорологических и технологических), а множество всех прочих факторов принимается за постоянные (или усредненные) величины.

Поэтому после получения регрессионных уравнений необходимо проверить правильность учёта факторных признаков, установить, имеется ли связь между исследуемыми переменными, и оценить тесноту и структуру этой связи. Этими задачами занимаются соответствующие разделы статистических исследований – корреляционный, факторный, ковариационный и дисперсионный анализ. Проведенный анализ полученных регрессионных уравнений с использованием средств и методов статистической обработки пакета MathCAD показал следующее:

- график взаимокорреляционной функции указывает на существенную зависимость выходного сигнала ω от входных стохастических возмущений θ , β , Δt и Q , что соответствует действительности;
- незначительное взаимовлияние входных параметров, которые можно принять независимыми переменными и соответствующими нормальному закону распределения;
- интервал корреляции, в пределах которого наблюдается статистическая связь между процессами, составляет несколько десятков отсчетов; процессы являются стационарными и эргодичными;
- парный коэффициент корреляции Пирсона, например, для двухфакторных регрессионных уравнений вентиляторной градирни составил: $\text{corr}(\omega, \theta) = 0,932$, $\text{corr}(\omega, \beta) = -0,147$, $\text{corr}(\theta, \beta) = -0,32$;
- дисперсии уровней для каждого возмущающего фактора, вычисленные по значениям критерия Фишера, свидетельствуют о большей точности линейной модели.

Реализация АСУ ТП водооборотных систем с ВГ. На рис. 4 представлена структурная схема одного из семи реализованных проектов компьютеризированной АСУ ТП водооборотной системы с ВГ производительностью $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и тремя секциями ВГ площадью 144 м^2 [3, 4].

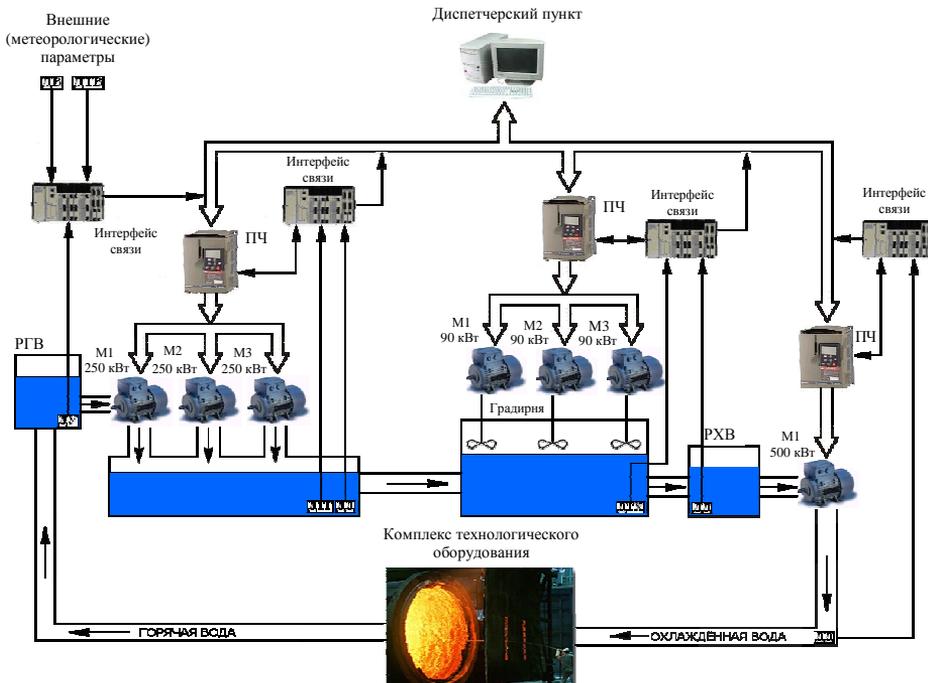


Рис. 4. АСУ ТП водооборотной системы с тремя секциями ВГ

На рис. 4 обозначено: ДВ, ДТВ – датчики влажности и температуры наружного воздуха; РГВ, РХВ – резервуары горячей и холодной воды; ДТГ, ДТХ – датчики температуры горячей и холодной воды; ДУ, ДД – датчики уровня и давления воды в резервуарах; ПЧ – преобразователи частоты для регулирования скорости вращения электропривода насосов подачи горячей воды (М1–М3, 250 кВт), холодной воды (М1, 500 кВт) и вентиляторов градирни (М1–М3, 90 кВт). Синхронизацию обмена информацией обеспечивают 4 интерфейса связи с диспетчерским пунктом.

Рассмотренная секционная градирня относится к классу ВГ с противотоком и предназначена для охлаждения оборотной воды, нагретой технологическими агрегатами в диапазоне температур $t_1 = 30 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$, до стабильной температуры $t_2^\circ = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ в условиях стохастического воздействия изменений температуры ($\theta^\circ = 0 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$) и влажности ($\beta = 20 \dots 100 \%$) воздуха, подачи циркуляционных насосов ($Q = 50 \dots 100 \%$) и температурного перепада горячей/охлажденной воды ($\Delta t = 2 \dots 12 \text{ }^\circ\text{C}$).

В рамках реализованной АСУ ТП водооборота разработаны методика синтеза алгоритмов и аппаратная поддержка для мониторинга и прогнозирования технического состояния в системе с ВГ. Они основаны на представлении объекта абстрактной динамической системой, функционирование которой состоит в изменении состояния системы под воздействием внешних и внутренних причин. Базирующиеся на таком подходе модели объекта позволяют синтезировать не только инвариантный к глубине диагностирования и структуре аппаратных средств алгоритм диагностической процедуры, но и применить унифицированные первичные датчики с измерением различных физических величин.

Предложенный подход позволяет путем разбиения диагностирующего автомата на иерархическую структуру подавтоматов рационально реализовать модели. Устройства верхнего уровня при этом универсальны, а устройства нижнего уровня сравнительно просты для типовых систем ВГ. В них объединены следующие функции: первичный датчик измеряемого параметра и схема анализа с информацией о состоянии параметра в норме [23, 26].

При реализации использован принцип экспертной системы, когда экспертные данные необходимы в качестве эталона для оценки текущего состояния системы. Они упорядочены и хранятся в памяти, составляя базу экспертных и базу реальных данных. Представленный алгоритм реализует одновременно две системы: компенсирующую инвариантную САР и экспертную систему. Работа первой заключается в прогнозировании аварийных режимов и недопущении их путем превентивного изменения (уменьшения, ограничения или даже отключения) соответствующих параметров, а работа экспертной системы заключается в прогнозе неисправностей с оповещением и советом оператору.

Для прогноза в режиме реального времени применены алгоритмы нечеткой логики с языковым синтаксисом, использующим лингвистические переменные. При этом использована предварительная фаззификация измеряемых переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения с помощью несложной схемы определяется прогнозируемое значение этого параметра. Система может быть реализована как автономно на специализированных *Fuzzi*-контроллерах, так и в составе компьютеров.

Для реализации всех рассмотренных выше функций мониторинга, управления и регулирования АСУ ТП водооборота с ВГ разработано ПО «GRADIRNY».

Программа написана на объектно-ориентированном языке Visual Basic с использованием среды разработки ADAM View фирмы Advantech. Программа функционирует в среде ОС Windows NT и представляет собой человеко-машинный интерфейс (HMI) для работы с данными в реальном времени через OPC-сервер от КИПиА, входящей в схему управления электроприводом ВГ. Интерфейс программы разработан в виде графических форм (окон) с использованием управляющих элементов (кнопок, индикаторов, «условных» элементов). Главное окно программы представлено на рис. 5. Количество «всплывающих» (подчиненных) окон – 3; количество переменных – 20.

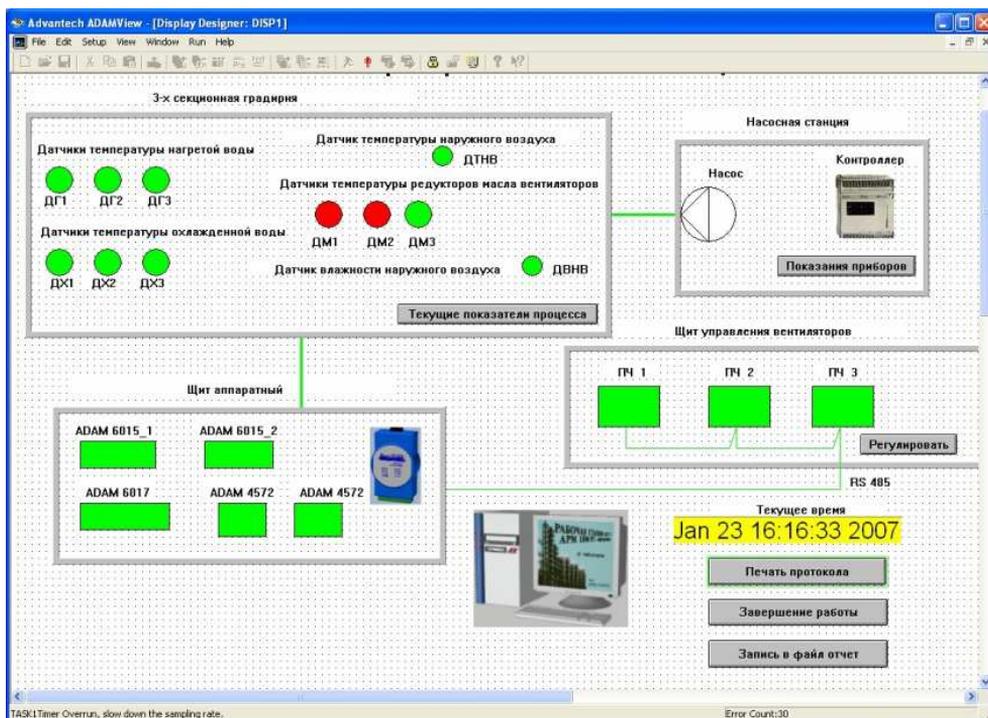


Рис. 5. Главное окно программы (управляющий интерфейс)

Выводы

1. Техничко-экономический эффект внедрения АСУ ТП вентилятора ВГ и быстрая окупаемость обеспечиваются: снижением энергопотребления на 22–60 % за счет регулируемого электропривода с алгоритмами, инвариантными к метео- и технологическим условиям работы; точным соблюдением оптимальных параметров ТП производства, приводящим к максимальной производительности охлаждаемых аппаратов и стабильному качеству выпускаемой продукции; минимальными финансовыми и эксплуатационными затратами на ТО и ремонт вентиляторного оборудования на протяжении всего срока службы. Разработанные водооборотные системы с ВГ внедрены на семи предприятиях нефтеперерабатывающей, горнодобывающей и металлургической промышленности.

2. Положительный опыт реализации проектов АСУ с водооборотными системами с градирнями и представленные методики целесообразно распространить на аналогичные технологические процессы и системы:

- аппараты воздушного охлаждения газа после его компримирования в газоперекачивающих агрегатах компрессорных станций;
- насосы и компрессоры теплообменников с паронагревателями, работающими в режиме онлайн с идентификацией параметров;
- воздуходувки котлоагрегатов, оснащенных топкой «кипящего слоя»;
- вентиляторы и транспортеры барабанных и трубных сушилок с необходимостью поддержания параметров продуктов с точностью $\pm 1\%$;
- системы воздушного отопления промышленных и административных зданий с регулированием подачи теплоносителя через калориферы и т.п.

Библиографический список

1. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госкомитет по делам строительства № 123, 27.07.1984. – М.: Изд-во ФГУП ЦПП, 2004.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справ. пособие / под общ. ред. В.С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
3. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2007. – 260 с.
4. Киянов Н.В., Крюков О.В., Прибытков Д.Н. Проекты автоматизации вентиляторных градирен // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 2. – С. 64–72.
5. Калужный А.П. Сравнительный анализ эффективности оборотного водоснабжения промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. – Киев: Изд-во Киев. нац. ун-та строительства и архитектуры, 2003. – 168 с.
6. Пужайло А.Ф., Спиридович Е.А., Крюков О.В. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / под ред. д-ра техн. наук О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 560 с.
7. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем

и задачи управления SICPRO'15. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2015. – С. 368–386.

8. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматиз. электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 409–414.

9. Киянов Н.В., Крюков О.В. Применение АСУ водооборотными системами в металлургических производствах // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 63–66.

10. Крюков О.В. Автоматизация водооборотных систем охлаждения с вентиляторными градирнями для химических и нефтехимических производств // Химическая техника. – 2014. – № 10. – С. 24–30.

11. Крюков О.В. АСУ водооборотными системами с градирнями // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 8. – С. 53–56.

12. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // Интеллектуальные системы: XI Междунар. симпозиум; Москва, 30 июня – 4 июля 2014 г. – М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2014. – С. 458–463.

13. Киянов Н.В., Крюков О.В. Автоматизация управления водооборотной системой с вентиляторными градирнями // Автоматизация. Современные технологии. – 2008. – № 7. – С. 13–20.

14. Киянов Н.В., Крюков О.В., Прибытков Д.Н. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62–68.

15. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.

16. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.Ю. Островляничка. – 2010. – С. 38–45.

17. Kryukov O.V. Electric Drive Systems in Compressor Stations with Stochastic Perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – С. 135–140.

18. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Pribytkov D.N. A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers // Russian Electrical Engineering. – 2007. – Т. 78. – № 11. – С. 621–627.

19. Воронков В.И., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2013. – № 7(693). – С. 74–78.

20. Киянов Н.В., Крюков О.В. Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУ ТП // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 29–34.

21. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8(710). – С. 50–56.

22. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. – 2008. – № 9. – С. 45–51.

23. Крюков О.В. Автоматизированная система энергосберегающего управления водооборотными системами с градирнями // Газовая промышленность. – 2011. – № 8. – С. 90–94.

24. Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

25. Автоматизированная система регулирования температуры охлажденной воды электроприводом вентиляторной градирни: пат. № 122162, МПК F28D1/00 / О.В. Крюков; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32.

26. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: материалы конф. / под ред. С.Н. Васильева. – М: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова. – С. 467–469.

27. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 157–163.

28. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В. Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки // Приводная техника. – 2012. – № 4. – С. 2–11.

29. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'12): материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2012. – С. 222–236.

30. Бабичев С.А., Бычков Е.В., Крюков О.В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30–36.

31. Крюков О.В., Серебряков А.В. Система оперативной диагностики технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. – 2015. – № 4. – С. 49–53.

32. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 6. – С. 3–6.

33. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

34. Гайдукевич В.И., Титов В.С. Случайные нагрузки электроприводов. – М.: Энергия, 1980. – 230 с.

References

1. SNiP 2.04.02-84*. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniia. Goskomitet po delam stroitel'stva № 123, 27.07.1984 [Construction Norms & Regulations 2.04.02-84*. Water supply. External networks and facilities. The state committee for construction № 123, 27.07.1984]. – Moscow: Izdatel'stvo FGUP TsPP, 2004.

2. Ponomarenko V.S., Aref'ev Iu.I. Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriatii [Cooling towers of industrial and energy enterprises: resource book.]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 376 p.

3. Kriukov O.V., Kiianov N.V. Elektrooborudovanie i avtomatizatsiia vodooborotnykh sistem predpriatii s ventilatornymi gradirniami [Electrical equipment and automation of water circulation systems of enterprises with mechanical-draft towers]. Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 260 p.

4. Kiianov N.V., Kriukov O.V., Pribytkov D.N. Proekty avtomatizatsii ventilatornykh gradiren [Automated ventilation cooling tower projects]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2007, no. 2, pp. 64-72.

5. Kaliuzhnyi A.P. Sravnitel'nyi analiz effektivnosti oborotnogo vodosnabzheniia promyshlennykh predpriatii [Comparative analyses of the in-plant recirculation efficiency]. Ph.D. Thesis. Kievskii natsional'nyi universitet stroitel'stva i arkhitektury, 2003. 168 p.

6. Puzhailo A.F., Spiridovich E.A., Kriukov O.V. Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii [Energy saving and electric equipment automation of electrical compressor stations]. Nizhniy Novgorod: Vektor TiS, 2010. 560 p.

7. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh sistem upravleniia elektroprivodami ob"ektov OAO "Gazprom" [Invariant electrical control systems strategy of the JSC Gazprom facilities]. *Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia SICPRO'15*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2015, pp. 368-386.

8. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Bychkov E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheskii svyazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technologically connected electric drives of main gas pipelines objects]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu, 7-9 October 2014*. Saransk: Mordovskii gosudarstvennyi universitet imeni N.P. Ogareva, 2014, vol. 2, pp. 409-414.

9. Kiianov N.V., Kriukov O.V. Primenenie avtomatizirovannoi sistemy upravleniia ASU vodooborotnymi sistemami v metallurgicheskikh proizvodstvakh [Application of the ACS in water run-around systems in metal practice]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 8, pp. 63-66.

10. Kriukov O.V. Avtomatizatsiia vodooborotnykh sistem okhlazhdeniia s ventilatornymi gradirniami dlia khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv [Automation of the water run-around cooling systems with fan cooling towers for the both chemical and petrochemical production]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2014, no. 10, pp. 24-30.

11. Kriukov O.V. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia vodooborotnymi sistemami s gradirniami [Automation Control Systems by the water run-around systems with the cooling towers]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2012, no. 8, pp. 53-56.

12. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh elektroprivodov gazotransportnykh sistem [Strategy of the invariant electric gas transporta-

tion systems]. *XI Mezhdunarodnyi simpozium "Intellektual'nye sistemy"*, 30 June – 4 July 2014. Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2014, pp. 458-463.

13. Kiianov N.V., Kriukov O.V. Avtomatizatsiia upravleniia vodooborotnoi sistemoi s ventilatornymi gradirniami [Control automation of the water run-around systems with the fan cooling towers]. *Avtomatizatsiia. Sovremennye tekhnologii*, 2008, no. 7, pp. 13-20.

14. Kiianov N.V., Kriukov O.V., Pribytkov D.N. Kontseptsiiia razrabotki invariantnykh avtomatizirovannykh elektroprivodov dlia vodooborotnykh sistem s ventilatornymi gradirniami [Development Strategy of the unambiguous automatic electric drive for the water run-around systems with the fan cooling towers]. *Elektrotehnika*, 2007, no. 11, pp. 62-68.

15. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095-1101.

16. Kriukov O.V., Gorbatushkov A.V., Stepanov S.E. Printsipy postroeniia invariantnykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [Invariant electric power facilities construction principles]. *Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaia elektronika"*. Novokuznetsk, 2010, pp. 38-45.

17. Kryukov O.V. Electric Drive Systems in Compressor Stations with Stochastic Perturbations. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, pp. 135-140.

18. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Pribytkov D.N. A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, no. 11, pp. 621-627.

19. Voronkov V.I., Kriukov O.V., Rubtsova I.E. Osnovnye ekologicheskie napravleniia i zadachi energosberezheniia pri proektirovanii ob"ektov OAO «Gazprom» [The main environmental directions and tasks of the power saving during the planning process of the joint stock company "Gazprom" object]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2013, no. 7(693), pp. 74-78.

20. Kiianov N.V., Kriukov O.V. Reshenie zadach promyshlennoi ekologii sredstvami elektrooborudovaniia i avtomatizirovannoi sistemoi upravleniia tekhnologicheskim protsessom [Problem solving of the industrial environment by the means of electric facilities and CAPCS]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 29-34.

21. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Povyshenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh OAO «Gazprom» [The increase of the operation resistance of the centrifugal blower electric drive on the compressor station of the joint stock company "Gazprom"]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50-56.

22. Kriukov O.V. Regressionnyye algoritmy invariantnogo upravleniia elektroprivodami pri stokhasticheskikh vozmushcheniiah [Regressive algorithms unambiguous control of the electric drive while stochastic perturbation]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 9, pp. 45-51.

23. Kriukov O.V. Avtomatizirovannaia sistema energosberegaiushchego upravleniia vodooborotnymi sistemami s gradirniami [Automated systems of the water run-around systems with the cooling tower energy saving management]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2011, no. 8, pp. 90-94.

24. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Metodologiya invariantnogo upravleniia agregatami kompressornykh stantsii pri sluchainykh vozdeistviiah [Methodology of the unambiguous unit management with the compressor plants during the random actions]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 64-70.

25. Kriukov O.V. Avtomatizirovannaia sistema regulirovaniia temperatury okhlazhdennoi vody elektroprivodom ventilatornoi gradirni [Automated system of the cooled water temperature regulation with the fan cooling tower electric drive]. *Patent RF No. 122162*, 2012.

26. Serebriakov A.V., Kriukov O.V., Vasenin A.B. Nechetkie modeli i algoritmy upravleniia vetroenergeticheskimi ustanovkami [Fuzzy models and the wind power plant control algorithms]. *Materialy konferentsii "Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova. pp. 467-469.

27. Kriukov O.V. Opyt sozdaniia energoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Experience in energy-efficient electric drives for gas pumping units creation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AITA-2014*. Saransk, 2014, pp. 157-163.

28. Kriukov O.V., Vasenin A.B., Serebriakov A.V. Eksperimental'nyi stend elektromekhanicheskoi chasti vetroenergeticheskoi ustanovki [Test bench of the electromechanical section of the wind driven generator unit]. *Privodnaia tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 2-11.

29. Kriukov O.V. Prikladnye zadachi teorii planirovaniia eksperimenta dlia invariantnykh ob"ektov gazotransportnykh sistem [Applied tasks of experimental design theory for the invariant objects of gas transportation system]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia (SICPRO'12)"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2012, pp. 222-236.

30. Babichev S.A., Bychkov E.V., Kriukov O.V. Analiz tekhnicheskogo sostoianiia i bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [The analysis of the mechanical condition and the electrically driven gas pumping unit security]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 9, pp. 30-36.

31. Kriukov O.V., Serebriakov A.V. Sistema operativnoi diagnostiki tekhnicheskogo sostoianiia vetroenergeticheskikh ustanovok [On-line diagnostics of wind driven power plant mechanical condition]. *Elektrotehnika*, 2015, no. 4, pp. 49-53.

32. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kriukov O.V. Avtomatizirovannaia sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigatelei gazoperekachivaiushchikh agregatov [AS of the on-line monitoring of the gas pumping power unit]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 6, pp. 3-6.

33. Kriukov O.V. Virtual'nyi datchik nagruzki sinkhronnykh mashin [Virtual load transducer of the synchronous machine]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 3, pp. 45-50.

34. Gaidukevich V.I., Titov V.S. Sluchainye nagruzki elektroprivodov [Random load of the electrical drive]. Moscow: Energiia, 1980. 230 p.

Сведения об авторе

Крюков Олег Викторович (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, главный специалист АО «Гипрогазцентр» (603950, Н. Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26, тел./факс. (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

About the author

Kryukov Oleg Victorovich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Associate Professor, Main Expert of JSC «Giprogazcenter» (603950, Nizhny Novgorod, 26, Alekseevskaya St., GSP-926, tel./fax.: (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

Получено 14.07.2016