

УДК 621.3

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИНВАРИАНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ОБЪЕКТ

**А.И. Зайцев**

*Профессор кафедры автоматизации и информатики в технических системах Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук, e-mail: vgtu-aits@yandex.ru*

**Н.В. Киянов**

*Соискатель кафедры электрооборудования судов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, e-mail: info@intermodul.nnov.ru*

**С.Н. Яшин**

*Заведующий кафедрой экономики и организации машиностроения Нижегородского государственного технического университета, доктор экономических наук, e-mail: info@intermodul.nnov.ru*

*Рассмотрены стратегии, структуры САР и алгоритмы управления частотно-регулируемым электроприводом при многофакторных стохастических внешних воздействиях на параметры объекта. Предложены методы получения регрессионных алгоритмов управления на примере АСУ ТП современных водооборотных систем с теплообменными аппаратами (вентиляторными градирнями). Представлены результаты комплексного статистического анализа автоматизированных электроприводов вентиляторов градирен методами планирования эксперимента и предложения по реализации.*

*Ключевые слова: автоматизированный электропривод, стохастические возмущения, регрессионные алгоритмы управления, инвариантные системы регулирования, вентиляторные градирни.*

### Введение

В настоящее время интенсивное развитие отечественного производства особенно в нефтегазовой, горнодобывающей, топливно-энергетической, металлургической и химической промышленности требует реализации самых совершенных наукоемких технологических процессов.

Роль автоматизированного электропривода (АЭП) как канала оптимального управления объектами при этом значительно возрастает и обуславливает поиск новых аппаратных средств и алгоритмических возможностей реализации предельных характеристик.

Применение частотно-регулируемого АЭП позволяет обеспечить энерго- и ресурсосбережение (особенно при работе на вентиляторную нагрузку); модернизацию и комплексную автоматизацию технологических процессов, повысить надежность и удобство обслуживания с единого диспетчерского поста АСУ ТП производства.

### Классификация АЭП со случайными нагрузками

Практика проектирования и реализации АЭП различного назначения показывает [1], что большинство механизмов и процессов функционирует в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры не остаются постоянными, как принимается упрощенно в простейших установках, а значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера (особенностями кинематики системы, колебаниями механической нагрузки и переходными режимами), так и иными внешними воздействиями (природными, метеорологическими, рельефными), которые носят преимущественно случайный характер.

В первом случае (рис. 1) АЭП, непосредственно с объектом воспринимая возмущения детерминированного или стохастического характера, должен отрабатывать все изменения кинетической энергии и нагрузки в соответствии с априори заложенным законом управления [2, 3].

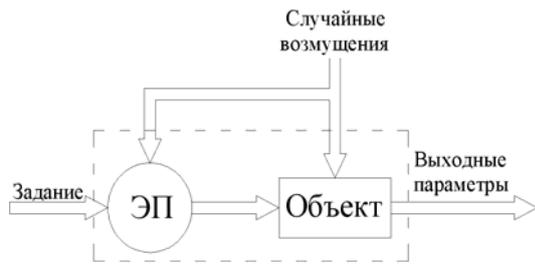


Рис. 1. АЭП с возмущениями 1-го рода

Во втором случае (рис. 2) АЭП непосредственно не подвержен возмущениям. Но с целью стабилизации выходных характеристик АСУ ТП на оптимальном уровне все воздействия на объект должны автоматически корректировать управляющие воздействия на него [3, 4].

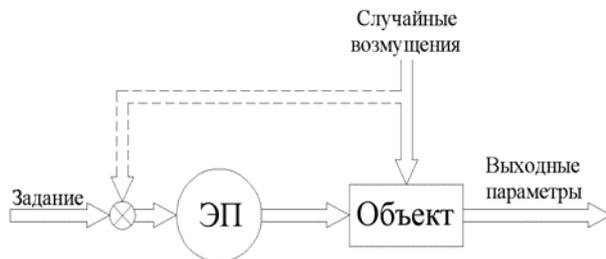


Рис.2. АЭП с возмущениями 2-го рода

Наиболее характерными примерами производственных механизмов со случайными возмущениями 1-го рода являются различные землеройные машины, драги, дробилки, мельницы, деревообрабатывающие и шлифовальные машины. Главными причинами стохастического графика нагрузки является влияние четырех групп случайных технических и технологических факторов, среди которых характерны неоднородность грунта, профиль трассы, люфты в кинематике, изменения параметров и характера работы. При этом коэффициент вариации для большинства процессов случайного нагружения АЭП достаточно велик и составляет  $k_v=0,4\div 0,9$ , а энергетический частотный спектр их заключен в диапазоне низких частот  $f_3=0,01\div 4$  Гц.

Совокупность случайных факторов, действующих на рабочие органы механизмов, определяет не только стохастический характер нагрузки, потребляемой мощности и скорости АЭП, но и его КПД, коэффициент мощности, продолжительность включения и частоту включения в час. Так как случайный процесс нагружения не может быть достоверно описан детерминированной нагрузочной диаграммой, то для адекватного расчета основных параметров АЭП и оптимизации алгоритмов регулирования необходимы статистические методы планирования эксперимента [3, 4].

Исследования с привлечением аппарата теории вероятности показали [2, 3], что процесс нагружения АЭП обычно распределен по закону

Райса, плотность распределения которого определяется выражением

$$W(V) = \begin{cases} V \cdot e^{-\frac{-(V^2+q^2)}{2}} \cdot I_0[V \cdot q], & \text{при } V > 0, \\ 0, & \text{при } V < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V = X/\sigma[x]$  – некая относительная величина, характеризующая функцию огибающей  $X(t)$ ;  $q = z/\sigma[x]$  – отношение сигнала  $z$  к шуму  $\sigma[x]$ ;  $I_0[Vq]$  – функция Бесселя нулевого порядка. Частными случаями закона Райса является распределение Релея при  $q = 2$  и Гаусса при  $q = 5$ . Для приближенных задач оценки случайной нагрузки АЭП целесообразно использовать таблицы этих распределений [2].

Методология оптимизации параметров АЭП со случайной нагрузкой при непосредственном ее воздействии на рабочие органы привода (1-го рода) основана на статистических функциях распределения (1) конкретной системы механизма или метода регрессионного анализа. При этом в зависимости от глубины статистических исследований используются методы коэффициентов случайного действия, статистически упорядоченных диаграмм или статистически эквивалентной величины.

### Принципы управления АЭП с возмущениями 2-го рода

При отсутствии непосредственного воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы АЭП (системы 2-го рода) наиболее целесообразна организация инвариантной системы управления, адекватно учитывающей все влияния возмущений на объект. Это особенно важно в мощных энергоёмких установках и технологических процессах, где точность отработки расчетных выходных параметров существенно влияет на работу технологического оборудования. Так, например, изменение значения температуры охлаждающей воды из градирни на  $\pm 1^\circ$  приводит к снижению мощности оборудования или перерасходу энергоносителей на  $0,5\div 4\%$ , а также к недовыпуску продукции на  $4\div 11\%$  [4].

Поэтому точная стабилизация температуры холодной воды играет важнейшую роль в эффективности всего производственного цикла. Для этого все влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления АЭП (пунктирная линия на рис. 2), обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию объекта.

Наиболее характерными примерами производственных механизмов со случайными воз-

мущениями 2-го рода являются различные локальные ЭП, входящие в комплекс АСУ ТП:

- насосы и вентиляторы брызгальных и пленочных градирен, входящих в водооборотные системы охлаждения производственного оборудования;
- насосы и компрессоры теплообменников с паронагревателями;
- вентиляторы и транспортеры барабанных и трубных сушилок и т.п.

Ранее в качестве электроприводов данных технологических установок использовались неэкономичные нерегулируемые системы с асинхронными машинами (общепромышленными, многополюсными, со встроенным редуктором, с повышенным пусковым моментом или многоскоростные). При работе в режимах S2 или S3 и для обеспечения плавного запуска инерционного вентилятора применялись переключения  $\Delta/Y$ , коммутаторы полюсов или устройства мягкого пуска. Данные АЭП решали только частные локальные задачи, не обеспечивая комплекса проблем автоматизации технологических процессов, особенно надежности и энергосбережения.

В качестве приводных двигателей в безредукторных электроприводах применяют многополюсные АД с кз ротором типов ВАСО (АСВО), ВАСВ и номинальной мощностью 30÷100 кВт (вертикального исполнения, специальные, обдуваемые или со штатным водяным охлаждением): ВАСО 14-16-32 У1 на 30 кВт, ВАСО 15-23-34 У1 на 75 кВт, ВАСВ 14-34-24 ВЗГ на 100 кВт. Особенности перечисленных выше электродвигателей:

- низкая номинальная скорость вращения ( $n_{\text{ном}} = 170 \div 242,5$  об/мин);
- относительно небольшие пусковые токи ( $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 3 \div 4,2$ );
- ограниченные пусковые моменты ( $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 0,5 \div 0,6$ );
- низкий номинальный коэффициент мощности ( $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,56 \div 0,7$ );
- закрытое или взрывозащищенное исполнение;
- продолжительный номинальный режим работы S1;
- контроль температуры обмотки статора от трёх встроенных терморезисторов;
- допустимое количество прямых пусков – 500 в год за срок службы 10000;
- место установки – на открытом воздухе.

Частотно-регулируемый АЭП ВГ "Altivar 61" и "Altivar 71" фирмы "Schneider Electric" позволяет обеспечить энергосбережение, модернизацию и комплексную автоматизацию существующих технологических процессов водооборота с вентиляторными градирнями (ВГ), повысить надежность и удобство обслуживания с единого диспетчерского поста.

### Комплекс требований инвариантного управления АЭП ВГ

Особенностями применения частотно-регулируемого АЭП ВГ являются:

1. Непрерывность (суточная, сезонная, годовая) водооборотного ТП, которая обуславливает работу АЭП в продолжительном режиме S1 со спокойным характером нагрузки. При этом случайные возмущения действуют непосредственно на охлаждающую способность ВГ, заставляя средствами АЭП корректировать скорость вращения вентилятора.

2. Необходимость и возможность работы вентилятора ВГ в зимний сезон на низких скоростях, т.к. остановка его даже на непродолжительное время нежелательна из-за переувлажнения обмоток статора АД, возможности разрушения подшипников и редуктора, а также "схлопывания" воздушного потока над градирней и образования наледи на лопастях вентилятора.

3. Большие постоянные времена теплотехнических процессов в ВГ (десятки минут) по сравнению с электромеханическими постоянными АЭП (единицы секунд) определяют приоритеты оптимизации по энергетическим показателям (КПД,  $\cos\varphi$ ) и статическим режимам, по отношению к медленным динамическим процессам.

4. Большие маховые массы вентилятора (диаметр колеса до 20 м, а суммарный момент инерции  $J_{\text{ЭП}} > 4J_{\text{АД}}$ ) и средние мощности приводного двигателя (до 150 кВт) обуславливают применение схем или устройств, облегчающих пуск и выход на номинальный режим инерционного ЭП, а также изменение скорости вращения вентилятора.

5. Четко выраженная вентиляторная нагрузочная характеристика  $M \propto k\omega^2$  с работой на сеть без противодействия диктует выбор параметров электрооборудования, исходя из наиболее напряженной точки в верхней части диапазона регулирования АЭП. Это связано с тем, что при превышении максимальной скорости вентилятора происходит развал устойчивого режима работы системы.

6. Технико-экономический эффект от применения частотного регулирования АЭП с законом управления  $U/f^2 = \text{const}$  обусловлен квадратичным снижением момента и кубическим – потребляемой мощности при уменьшении скорости вращения вентилятора ВГ. Так, например, при требуемом снижении скорости вентилятора в 3 раза, нагрузка на ЭП падает в 9 раз, а потребляемая мощность – в 27. То есть АЭП вместо 150 кВт будет потреблять только 5,6 кВт (4% установленной мощности).

7. Необходимость и возможность оперативно и автоматически отслеживать случайные климатические и технологические изменения,

действующие на ВГ, и адекватно им задавать скорость АЭП вентилятора. Это позволяет стабилизировать охлаждающую способность ВГ по регрессионным алгоритмам в функции основных возмущений и обеспечить её инвариантность при любых условиях.

8. Стабилизация температуры холодной воды путем пропорционально-интегрального регулирования скорости вращения АЭП вентилятора в замкнутой САУ [6] в соответствии с требованиями работы в заданном оптимальном режиме ТП.

9. Непрерывное диагностирование и прогнозирование технического состояния оборудования всей водооборотной цепи ТП с использованием лингвистических алгоритмов *fuzzy-logic*, реализованных на объектно-ориентированном языке Visual Basic с использованием среды разработки ADAMView фирмы "Advantech".

10. Необходимость и возможность интегрирования локальных АЭП насосов и вентиляторов ВГ в единую АСУ ТП водооборотного цикла (производства). ПО и руководство оператора "GRADIRNY" должны соответствовать ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 14764–2002 [5] и функционировать в среде ОС Windows NT и обеспечивать мониторинг и управление с рабочего места ПК аппаратной частью водооборотной системы с ВГ.

Комплексное решение проблем реализации АЭП с ВГ при существенных стохастических возмущениях представлены в нескольких проектах [1, 5]. Они включают в себя разработку аппаратной части (силовые и информационные схемы), алгоритмического и ПО. Реализация аппаратной части АСУ ТП, в зависимости от конкретного производства, выполнена с функциями регулирования скорости привода (плавно или дискретно), мониторинга и дистанционного управления.

### Структура и алгоритмы управления АЭП вентиляторов ВГ

В качестве одного из примеров системной реализации перечисленных выше требований на рис. 3 представлена структурная схема проекта компьютеризированной АСУ ТП водооборота производительностью  $Q = 1000$  куб.м/час с ВГ и тремя секциями площадью 144 кв. м [4, 5] для одного из горнодобывающих предприятий России.

Электрооборудование системы состоит из АЭП с преобразователями частоты Altivar 61 для насосов холодной (250 кВт) и горячей (500 кВт) воды и вентиляторов ВГ (90 кВт), датчиков влажности и температуры наружного воздуха, резервуаров с датчиками температуры горячей и холодной воды, а также датчиками уровня, расхода и давления воды в резервуарах. Синхронизацию обмена данными с диспетчером обеспечивают 5 интерфейсных шлюзов связи с управлением от промышленного компьютера IPC-610.

Главными стохастическими возмущениями для ВГ являются метеорологические факторы: температура, влажность воздуха, давление, наличие и интенсивность ветра, осадков и пр.; и технологические: изменения подачи циркуляционных насосов и температуры горячей воды или температурного перепада воды  $\Delta t$ . Наибольшее влияние на процесс охлаждения оказывают значения 4 параметров: перепад температур воды  $\Delta t = 2 \div 12$  °С; температура окружающего воздуха  $\theta = 5 \div 35$  °С; его влажность  $\beta = 50 \div 100\%$  и подача насоса  $Q = 50 \div 100\%$ .

Электропривод вентилятора градирни является фактически единственным каналом воздействия на охлаждающую способность градирни. Так как скорость вращения вентилятора  $\omega$  задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры холодной воды необходимо:

- получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков в цикле с дискретностью порядка минуты;
- вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения вентилятора градирни по аналитическим регрессионным алгоритмам

$$\omega_3 = f(\Delta t, \theta, \beta, Q); \quad (2)$$

- скорректировать  $\omega_3$  с учетом стабилизирующего действия обратной связи по выходной координате, т.е. температуре охлажденной воды  $t_2 = 28$  °С.

Для реализации первых двух задач рассмотрены экспериментальные данные  $\omega = f(\theta)$  и  $\omega = f(\beta)$  градирни ВГ-70СП (рис. 4). Очевидный нелинейный и стохастический характер представленных зависимостей и аналогичный вид остальных –  $\omega = f(\Delta t)$ ;  $\omega = f(Q)$  и т.п. – предпола-

гает применение для их обработки и формализации статистических методов, основанных на приложениях центральной теоремы теории вероятности. Поэтому искомые многопараметрические зависимости (2) были получены в виде нелинейных и линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов [4].

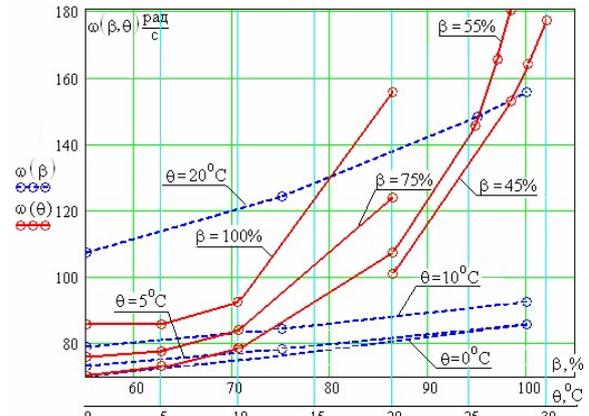


Рис. 4. Опытные данные градирни ВГ-70СП

В результате обработки исходных массивов численных данных градирни с АЭП по системе ПЧ-АД мощностью  $P_{\text{ном}} = 90$  кВт, работающего на вентилятор по закону  $U\omega^2 = \text{const}$ , с использованием программных средств Matlab и Mathcad, получены следующие искомые управляющие функции:

- для линеаризованной 2-факторной модели  $\omega_2 = 3.8 \cdot \theta + 0.38 \cdot \beta + 30.99; \quad (3)$
- для линеаризованной 4-факторной модели  $\omega_4 = 12.21 \cdot \Delta t + 0.92 \cdot \theta + 0.22 \cdot \beta - 0.22 \cdot Q + 9.6. \quad (4)$

При формализации зависимостей  $\omega = f(\theta, \beta)$ , представленных на рис.4, показательными функциями  $y = x^n$  искомые регрессионные модели и алгоритмы управления будут иметь вид

$$\omega = A \cdot \Delta t^{a_1} \cdot \beta^{a_2} \theta^{a_3} \cdot Q^{a_4}, \quad (5)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – показатели интенсивности каждого из возмущающих воздействий. После логарифмирования и подстановки численных значений в (5) и операций потенцирования уравнение нелинейной регрессии для 4-факторной модели будет иметь вид

$$\omega'_4 = 61.33 \cdot \Delta t^{1.01} \cdot \beta^{0.12} \cdot \theta^{0.04} \cdot Q^{-0.3}. \quad (6)$$

Аналогично получается нелинейная 2-факторная регрессионная модель

$$\omega'_2 = 43.82 \cdot \beta^{0.08} \cdot \theta^{0.24}. \quad (7)$$

Анализ сходимости результатов моделирования для 4-факторных моделей показал, что обе регрессионные модели (4) и (6) обеспечивают достаточную точность инвариантного задания  $\omega_3$  во всем диапазоне изменения возму-

щений. Поэтому для расчёта  $\omega_3$  целесообразнее использовать более простое линеаризованное уравнение (4). Аналогичный вывод можно сделать по поводу 2-факторных моделей (3) и (7).

Проведённый выше регрессионный анализ заключался в определении аналитического выражения связи, в котором изменение результирующего 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 величины. Поэтому после получения моделей необходимо проверить правильность учёта факторных признаков, установить, имеется ли связь между переменными, и оценить тесноту и структуру этой связи. Это задачи статистических исследований корреляционного, факторного, ковариационного и дисперсионного анализа.

Анализ полученных регрессионных алгоритмов с использованием средств и методов статистической обработки пакета Mathcad показал:

- график взаимокорреляционной функции подтверждает связь  $\omega_3$  по формуле (2);
- нормальный закон распределения входных параметров без взаимовлияния;
- интервал корреляции со статистической связью процессов – десятки отсчетов;
- стохастические процессы являются стационарными и эргодичными;
- парный коэффициент корреляции Пирсона на 2-факторных уравнений составил:

$$\text{corr}(\omega, \theta) = 0.932, \text{corr}(\omega, \beta) = -0.147, \text{corr}(\theta, \beta) = -0.32.$$

- дисперсии уровней каждого фактора говорят о точности линейной модели.

- при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  значение критерия Фишера для степеней свободы  $f_1 = f_2 = 26$  составляет менее 1.95, что доказывает адекватность обеих моделей.

Однако особенностью систем управления АЭП по возмущению является то, что управляющий сигнал формируется в зависимости от внешних воздействий и уменьшает влияние их на выходную величину объекта путем компенсации. При этом строго учесть и точно измерить все случайные возмущения невозможно, и для точной стабилизации температуры  $t_2$  необходимо реализовать комбинированную САР [4] скоростью вращения АЭП с отрицательной обратной связью по температуре охлажденной воды  $t_2$  (рис. 5).

Алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых АЭП разработано на основе статистических методов планирования эксперимента, апробировано путем моделирования и физического макетирования на стенде мониторинга. Для проверки адекватности разработанных алгоритмов задания и стабилизации тем-

пературы охлажденной воды из градирни производилось моделирование технологических процессов в пакете Simulink. Каналы управления ПЧ-АД и обратной связи по температуре воды соответствуют проектным значениям.

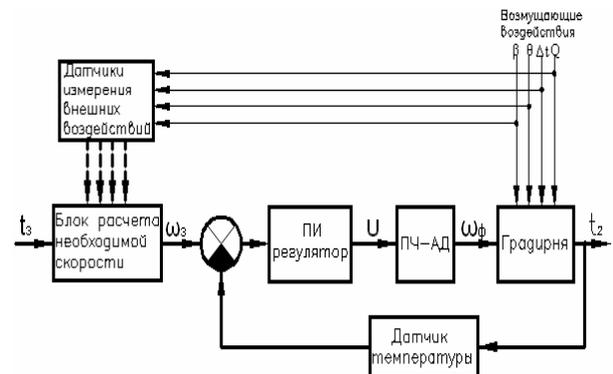


Рис. 5. Структура комбинированной САР

Для имитации действия возмущений на саму градирню в систему введены два функциональных блока преобразований, обеспечивающие приращение к температуре воды при изменении метеорологических и технологических условий испарительного охлаждения в вентиляционной градирне. Получен достаточный объем наглядных результатов [4], подтверждающих корректность реализации данного проекта.

В результате проведенных проектных и исследовательских работ по разработке и внедрению АСУ ТП водооборотными системами с АЭП вентиляторных градирен на предприятиях нефтехимической, строительной, металлургической и горнодобывающей промышленности, решена актуальная задача теоретического обоснования и технической реализации инвариантных энергосберегающих САР АЭП ВГ с учетом интегрирования их в систему телемеханики и диспетчеризации предприятия.

### Выводы

1. В результате анализа функционирования автоматизированных электроприводов в условиях воздействия существенных стохастических возмущений технологического и природного характера выделены два класса систем, для которых разработаны способы инвариантного управления по различным критериям оптимизации.

2. На примере частотно-регулируемого АЭП вентилятора градирни водооборотной системы предприятия показана возможность инвариантного регулирования выходных параметров водооборота, в зависимости от сезонных метеорологических и технологических изменений большого числа случайных факторов. Средства АЭП ВГ с полным диапазоном регулирования по регрессионным уравнениям позволяют обеспечить рациональные режимы энергосбе-

режения и быстрой окупаемости системы при работе на вентиляторную нагрузку, мониторинга и диагностики работы водооборотной системы, а также интегрировать ее в АСУ ТП всего производства.

3. Результаты статистического анализа, макетирования и моделирования в среде Matlab с компьютерным расчётом скорости вращения

вентилятора подтверждают адекватность и целесообразность применения частотно-регулируемых АЭП для реализации инвариантных алгоритмов. Практическая реализация проектов АЭП различных производств при стохастических возмущениях [3-5] гарантировали высокие технико-экономические показатели новых промышленных систем.

#### *Литература*

1. Киянов Н.В. Опыт проектирования и реализации автоматизированных систем электроприводов производства фирмы «Интермодуль» в различных отраслях промышленности / Н.В. Киянов, О.В. Крюков // Труды XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ-2007) / УПИ – УГТУ. – Екатеринбург, 2007. – С. 223–226.

2. Гайдукевич В.И. Случайные нагрузки силовых электроприводов / В.И. Гайдукевич, В.С. Титов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 161 с.

3. Методология оптимизации инвариантного управления электроприводом в условиях стохастических возмущений / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, А.В. Горбатушков, М.В. Блинов // Труды V Междунар. конф. по автоматизир. электроприводу (АЭП-2007) / СПбГПУ. – СПб., 2007. – С. 54–57.

4. Крюков О.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями : монография / О.В. Крюков, Н.В. Киянов ; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2007. – 260 с.

5. Киянов Н.В. Проекты автоматизации вентиляторных градирен / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Д.Н. Прибытков // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 2. – С. 6–12.

6. Патент 65633 Российская Федерация, МПК F28D1/047. Автоматизированная система регулирования температуры охлажденной воды электроприводом вентиляторной градирни / Киянов Н.В., Крюков О.В., Горбатушков А.В., Прибытков Д.Н. – Приоритет 03.11.2006 г., опубли. 10.08.2007, Бюл. № 22.