



# Электрическая часть системы регулирования и защиты паровой турбины

Максим Кузнецов, Евгений Алсуфьев

В статье описывается программно-технический комплекс электрической части системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ), предназначенный для автоматизации функций системы регулирования новых или реконструируемых паровых турбин. Приводятся архитектура, принципы работы и особенности системы, краткое описание математической модели паровой турбины.

### История создания системы

Предпосылкой к отказу от механо-гидравлической системы регулирования паровых турбин в теплоэнергетике и созданию электрической части системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ) в 2005 году стал ряд причин, среди которых:

- развитие технической базы вычислительной техники и её массовое применение в других отраслях;
- повышение требований к качеству электрической и тепловой энергии, достижение которых традиционными средствами затруднительно;
- повышение требований к надёжности систем защиты турбоагрегатов;
- стремление упростить производство, испытания, наладку, а также эксплуатацию системы регулирования;
- необходимость создания универсальной системы, пригодной для использования с различными типами паровых турбин, а также с широкими возможностями расширения функционала при наличии такой потребности;
- невозможность реализации современной технологии работы турбины средствами механогидравлических систем автоматического регулирования и защиты.

Работы проводились специалистами НПФ «Ракурс» в тесном сотрудничестве с отделом микропроцессорных систем управления ЗАО «Уральский турбинный завод».

В качестве основы элементной базы выбраны средства промышленной автоматизации фирмы OMRON. При выбо-

ре в первую очередь учитывались надёжность компонентов, их технико-экономические показатели, а также имеющийся у исполнителей опыт по реализации систем управления на базе подобных средств.

### Назначение и функции ЭЧСРиЗ

ЭЧСРиЗ предназначена для формирования сигналов регулирования и защиты паровой турбины в соответствии с заложенными алгоритмами во всём возможном диапазоне эксплуатационных и аварийных режимов работы, в том числе:

- толчок;
- разворот;
- холостой ход;
- работа в сети под нагрузкой;
- сброс электрической нагрузки;
- режим останова (как нормального, так и аварийного);
- испытания и снятие характеристик.

Объектом автоматизации является паровая турбина, предназначенная для привода электрического генератора с частотой вращения  $50 \text{ с}^{-1}$  (3000 об/мин) и отпуска теплоты для нужд производства, отопления и горячего водоснабжения. Паровая турбина может быть как новой, так и модернизируемой с замкнутой системы регулирования.

ЭЧСРиЗ позволяет осуществлять регулирование различных типов паровых турбин, работающих:

- в схеме с поперечными связями по свежему пару;
- в блоке с котлом;

- в составе энергоблока парогазовой установки ПГУ (газотурбинная установка, котел-утилизатор, паротурбинная установка);
- в составе энергоблока паротурбинной установки (предвключённая/приключённая турбина).

### Архитектура системы

Структура ЭЧСРиЗ в общем виде приведена на рис. 1. ЭЧСРиЗ представляет собой многоуровневую распределённую систему управления, выполненную на базе программируемых логических контроллеров и средств вычислительной техники. Верхний уровень ЭЧСРиЗ образует рабочая станция оператора (PCO), которая совмещает в себе функции средства отображения и контроля, а также функции сервера (при подключении к внешней АСУ ТП для передачи данных по сети Ethernet). Средний уровень ЭЧСРиЗ образует дублированный управляющий контроллер, нижний – сервоприводы, которые реализуют управление электрогидравлическими преобразователями в качестве усилителей сигналов от контроллеров.

Питание системы осуществляется от вводов переменного и постоянного тока. Для обеспечения бесперебойным питанием силового оборудования организован быстродействующий автоматический ввод резерва (АВР).

Связь между контроллерами и PCO осуществляется по сети Ethernet. В общем случае используется проводное соединение, при необходимости могут быть применены оптические каналы связи.

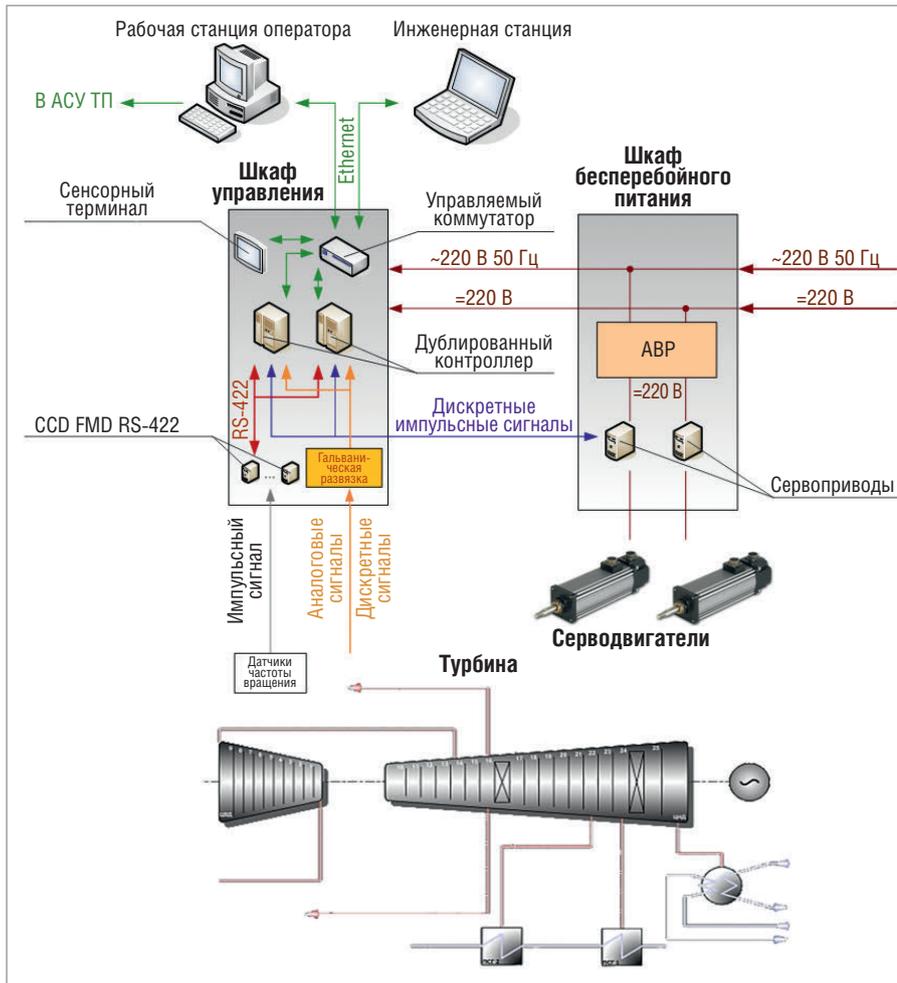


Рис. 1. Структура ЭЧСРиЗ в целом виде

Получение информации от полевых устройств (датчиков, исполнительных механизмов) осуществляется посредством аналоговых, дискретных и импульсных сигналов. Состав сигналов зависит от типа турбины, при этом контроллер обладает необходимыми ресурсами для работы со всеми требуемыми типами сигналов. Все входные цепи имеют обязательную гальваническую развязку.

Для реализации местного управления в состав системы включён программируемый сенсорный терминал.

В целом архитектура системы не зависит от типа автоматизируемой турбины и не претерпела существенных изменений с момента создания до настоящего времени.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Как уже было сказано, основу системы образуют средства промышленной автоматизации OMRON. В частности, это программируемые логические контроллеры серий CS1 и CJ2. Первоначально система разрабатывалась на базе линейки дублированных

контроллеров CS1D-CPU65H. Со временем, после выхода линейки CJ2, осуществлён переход на использование двух контроллеров CJ2H-CPU64EIP, что позволило не только существенно увеличить быстродействие, но и расширить функциональность, не ухудшив при этом характеристики надёжности: при использовании CJ2 выполняется резервирование не только источников питания и процессорных модулей, но и модулей ввода/вывода и модулей связи.

Управление электрогидравлическими преобразователями осуществляется с помощью сервоприводов OMRON серии Sigma-II. С учётом особенностей схемы важной характеристикой данных устройств является то, что их питание может осуществляться от напряжения как переменного, так и постоянного тока.

Электрогидравлические преобразователи представляют собой электрические серводвигатели с постоянными магнитами либо с вращательным перемещением штока (OMRON серии SGMPH), либо с поступательным (EX-LAR серии GSX20). Схема питания и управления унифицирована, поэтому использование того или иного типа двигателя не отражается на остальном оборудовании.

Программирование контроллеров и настройка приводов осуществляются с помощью средств интегрированного программного пакета OMRON CX-One.

Измерение частоты вращения производится датчиками Graup. Сигнал от датчиков для преобразования и обеспечения функции защиты от разгона поступает на модули CCD FMD-RS422 производства группы компаний «Ракурс». Модуль осуществляет расчёт частоты вращения на основании полученных данных, сравнение значения с уставками срабатывания защиты и передачу данных в управляющий контроллер, где они используются для функций регулирования.

Для программного обеспечения рабочей станции оператора и инженерной станции (ИС) применена SCADA-система RSP также собственной разработки компании «Ракурс». Такое решение обусловлено тем, что ЭЧСРиЗ представляет собой автономную локальную систему со специфическим и весьма ограниченным набором функций, и использование распространённых многофункциональных пакетов SCADA-систем в данном случае представляется технически и экономически неоправданным. При этом RSP хорошо зарекомендовала себя в подобных локальных системах и успешно внедрено и эксплуатируется на десятках объектов в России и за её пределами. На сегодняшний день с использованием RSP разработано 11 систем контроля вибрации, более 20 ЭЧСРиЗ, более 50 систем технологического контроля.

Контроллеры, сервоприводы и другое оборудование размещаются в шкафах



Рис. 2. Внешний вид шкафов с оборудованием ЭЧСРиЗ, установленных на одном из объектов

Rittal. Шкафы устанавливаются на площадке обслуживания турбины вблизи переднего подшипника. Выбор места установки обусловлен ограничением длины кабелей от сервоприводов до электрогидравлического преобразователя. Для поддержания приемлемого температурного режима на шкафы устанавливаются холодильные агрегаты Rittal.

Внешний вид шкафов с оборудованием ЭЧСРиЗ, установленных на одном из объектов, представлен на рис. 2.

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

ЭЧСРиЗ выполняет следующие функции:

- регулирование частоты вращения турбины (ПИ-регулирование при работе на холостом ходу, П-регулирование при работе в сети под нагрузкой со степенью неравномерности  $4,5 \pm 0,5\%$ );
- регулирование активной электрической мощности с частотной коррекцией (при работе в сети);
- регулирование давления/расхода производственных и отопительных отборов пара;
- регулирование температуры или нагрева (разницы температур) сетевой

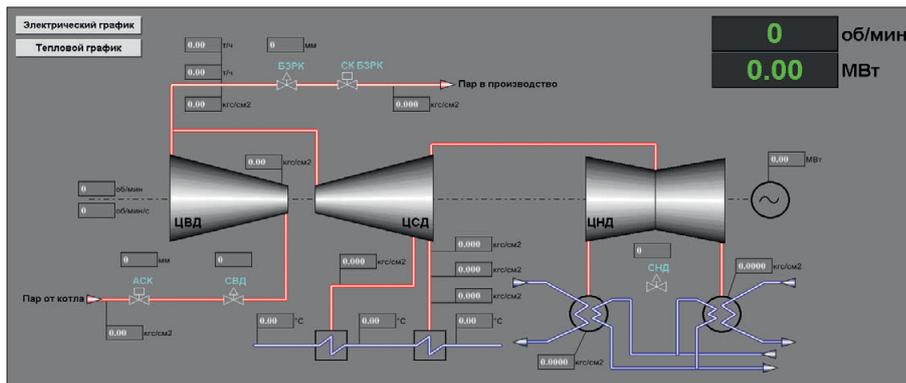


Рис. 3. Внешний вид экрана «Главная схема»

воды с подчинённым контуром регулирования давления отопительного отбора пара;

- обеспечение безопасной эксплуатации турбины и защиты от неправильных действий оперативного персонала (соблюдаются ограничения по минимальному давлению свежего пара, максимальному давлению в регулирующей ступени, максимальному давлению в камерах производственных и отопительных отборов, ухудшению вакуума в конденсаторе и т.д.);
- защита турбины от разгона (многоканальный электронный автомат безопасности ЭАБ обеспечивает останов турбины при достижении ротором

предельной частоты вращения с учётом величины ускорения ротора);

- обеспечение приёма и обработки сигналов электрических защит турбоустановки;
- обеспечение приёма и обработки сигналов противоаварийной автоматики энергосистемы;
- контроль основных параметров ЭЧСРиЗ и изменение параметров настройки;
- контроль датчиков, линий связи с объектом и цепей питания;
- тестирование каналов электронного автомата безопасности, совмещённое с расхаживанием золотников защит;
- безударное включение и выключение регуляторов во всех режимах эксплуатации;

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ INNODISK

**PROSOFT**<sup>®</sup>

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru



Реклама

- безударное изменение алгоритмов регулирования при обнаружении отказов;
- обеспечение проведения необходимых испытаний (разгон, повышение давления в регулируемых отборах и др.) и определения характеристик;
- оповещение, регистрация и архивирование сообщений об изменении режимов и отклонениях в работе турбины (в том числе аварийных);
- обеспечение связи с системами верхнего уровня (АСУ ТП).

Управление системой может осуществляться как с рабочей станции оператора (дистанционный режим), так и с местного пульта, расположенного на двери шкафа управления (местный режим). Внешний вид управляющих экранов приведён на рис. 3–4.

Функции регулирования осуществляются путём управления электрогидравлическими преобразователями в зависимости от задания, текущего значения параметра и соответствующего закона регулирования. Система построена по принципу каскадного регулирования: внутренним (подчинённым) контуром является контур положения сервомотора регулирующего органа, внешним — программный регулятор

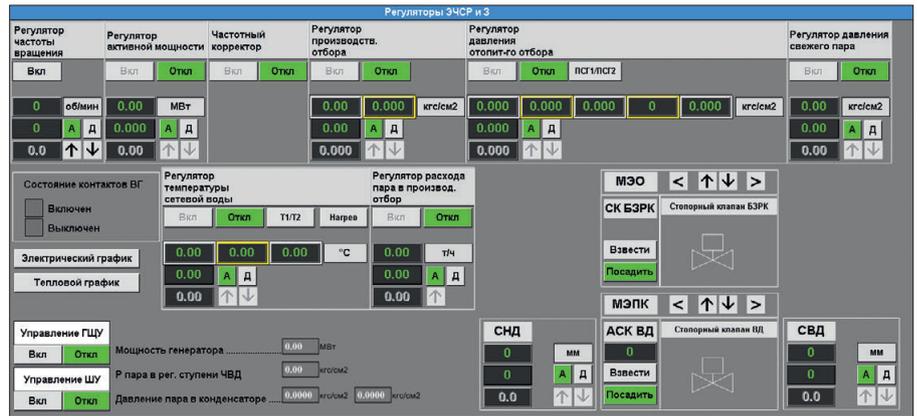


Рис. 4. Внешний вид экрана «Регулирование» (основной управляющий экран)

(регулятор частоты вращения, электрической мощности, давления и др.). Допускается задание как непосредственно положения сервомотора, так и технологического параметра в зависимости от режима работы. Включение/отключение регуляторов, а также изменение их параметров происходит безударно. Возможна одновременная работа нескольких регуляторов в случае, если их действие распространяется на разные исполнительные механизмы. Взаимное влияние контуров друг на друга исключается путём выполнения соответствующих настроек закона регулирования, в том числе с

использованием математической модели объекта.

На рис. 5 в качестве примера приведён график разворота (разгона) турбины Т-113/145-12,4 ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ. В этот момент в работе находятся регуляторы положения и регулятор частоты вращения. Красный график показывает изменение частоты вращения в процессе пуска, зелёный — положение сервомотора регулирующего клапана высокого давления. Процесс набора частоты вращения происходит без колебаний. Темп роста частоты задаётся заводом-изготовителем. Площадки на красном графике соответ-

Работают от **-40°C**







## Профессиональные системы климатизации для электронного оборудования в помещении и на улице

- Холодильные агрегаты (кондиционеры)
- Термоэлектрические охладители
- Обогреватели
- Воздухо-воздушные теплообменники
- Воздухо-водяные теплообменники



**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ MCLEAN**



**МОСКВА**  
**С.-ПЕТЕРБУРГ**  
**ЕКАТЕРИНБУРГ**

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru  
Тел.: (812) 448-0444 • Факс: (812) 448-0339 • info@spb.prosoft.ru • www.prosoft.ru  
Тел./факс: (343) 376-2820/310-0106 • info@prosoftsystems.ru • www.prosoftsystems.ru

Реклама

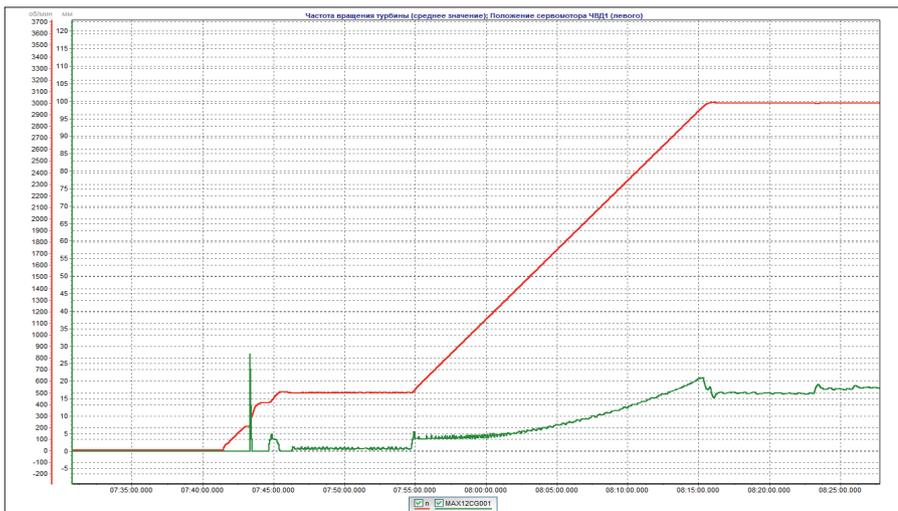


Рис. 5. График разворота турбины Т-113/145-12,4 ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ

ствуют выдержке времени для равномерного прогрева турбины. Зелёный пик на графике связан с изменением задания по ускорению турбины, а первые два пика — с работой регулирующего клапана в режиме толчка: приоткрылся, пар толкнул турбину, и клапан снова закрылся.

Кроме функций регулирования, системой выполняются функции защиты. Подсистема защит выполняется многоканальной (3 или 5 каналов) с логикой срабатывания на останов на

гидравлическом уровне. Возможна проверка каждого канала в отдельности без останова, независимо от текущего режима работы основного оборудования, в том числе при работе под нагрузкой. Важной особенностью является то, что подсистема защит выполняется полностью независимой от управляющего контроллера, который в данном случае дублирует её действия. При этом существенно повышается надёжность и снижается вероятность отказа типа «пропуск аварии». Тести-

рование защит осуществляется формированием тестового сигнала от встроенных генераторов, которые подключаются вместо датчиков (в том числе частоты вращения). Таким образом, проверке подвергается весь канал подсистемы защиты, начиная от измерителя и заканчивая исполнительным механизмом. Процедура полностью автоматизирована и может выполняться как по команде оператора, так и с заданной периодичностью с формированием необходимой сигнализации. Время срабатывания защиты не превышает 100 мс. Подобная структура системы, а также применение высоконадёжных аппаратных средств позволили добиться уровня полноты безопасности SIL3 согласно ГОСТ Р МЭК 61508 (IEC 61508).

### МОДЕЛЬ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

При разработке, испытаниях и наладке ЭЧСРиЗ широко используются методы математического моделирования, что позволяет проводить полный комплекс предпоставочных испытаний ЭЧСРиЗ согласно утверждённой программе.

Математическое обеспечение модели паровой турбины представляет собой





**Connect Tech Inc.**  
Embedded Computing Experts

**БОЛЬШЕ КАНАЛОВ в жёстких условиях!**

**Мультипортовые платы последовательных интерфейсов**





- Форм-факторы PC/104, PC/104-Plus, PCI (SP/LP), PCIe, PCIe/104, cPCI 3U
- До 8 портов RS-232/422/485 на плате
- Скорость до 1,8 Мбит/с на порт, аппаратная буферизация
- Гальваническая изоляция 3 кВ
- Диапазон рабочих температур -40...+85°C
- Многолетняя гарантия и бесплатная техническая поддержка
- Готовые драйверы для ОС Windows, QNX и Linux

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПОСТАВЩИК ПРОДУКЦИИ CONNECT TECH INC.**



**Москва**  
**С.-Петербург**

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru  
Тел.: (812) 448-0444 • Факс: (812) 448-0339 • info@spb.prosoft.ru • www.prosoft.ru

Реклама

систему дифференциально-разностных уравнений, описывающих динамическое поведение турбины во всех технологических режимах, а также описание гидравлической части системы управления турбиной и энергосистемы, на которую работает турбина.

Описание основной части турбины состоит из взаимосвязанных подпрограмм, состав которых может меняться в зависимости от конфигурации конкретной турбины. Возможность варьирования набора вызываемых подпрограмм позволяет быстро настраивать модель для имитации турбин, обладающих следующими параметрами:

- различный состав проточных частей турбины (часть высокого давления, одна или две части среднего давления, промежуточный отсек ступеней, часть низкого давления), а также различный состав регулирующих органов (клапаны и диафрагмы);
- наличие производственных отборов и блока защитно-регулирующих клапанов (БЗРК);
- наличие отопительных отборов различных типов (работа на общий коллектор или на сетевые подогреватели).

Описание гидравлической части турбины позволяет моделировать изменение давления масла в линии защиты и работу золотников защиты. В модели также реализовано управление сервомоторами высокого, среднего и низкого давления посредством соответствующих золотников согласно их натурным характеристикам с учётом зон нелинейной работы.

Математическое описание энергосистемы включает в себя закономерности поведения турбины при работе на изолированный район и на мощную энергосистему в зависимости от параметров потребления электроэнергии.

Конструктивно модель выполнена в виде передвижной стойки, на которой расположены все аппаратные элементы: основной микропроцессорный модуль, модули ввода и вывода сигналов, блоки питания и клеммники для физического подключения модели к шкафу ЭЧСРиЗ. Это позволяет проводить испытания без использования в программном обеспечении ЭЧСРиЗ каких-либо режимов, предназначенных только для тестирования. Все связи ЭЧСРиЗ и модели турбины выполняются таким же образом, как и в условиях электростанции.

Главным вычислительным устройством модели является контроллер OMRON CJ2, производительность которого позволяет обрабатывать сложную математику, описывающую поведение паровой турбины, с постоянным циклом длительностью 10 миллисекунд.

Модель турбины позволяет проводить комплексные испытания работы ЭЧСРиЗ в условиях взаимосвязанного изменения всех параметров турбины согласно физическим закономерностям протекания технологических процессов паровой турбины и сопутствующего оборудования.

## РЕЗЮМЕ

Используемые технические решения, дублированная архитектура, автономная подсистема защит, испытания с использованием математической модели в комплексе со специализированным обучающим курсом для персонала станций позволили получить высоконадёжную отказоустойчивую систему. В настоящее время электрическая часть системы регулирования и защиты паровой турбины выполняется «Ракурс-Инжиниринг» не только на базе автоматизации OMRON, но и на элементной базе SIEMENS. ●

**VIPA**

**PROFIBUS**

**PROFINET**

**SPEED7 и PROFINET**

*Технологии, созданные для будущего*

PROFIBUS или PROFINET? Вот в чем вопрос!  
С новыми контроллерами VIPA SPEED7 вам не нужно выбирать.  
Процессоры VIPA CPU 315PN и 317PN идеально подходят для проверенной технологии PROFIBUS, дополняя ее очевидными преимуществами PROFINET.

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ VIPA**

**ProSoft**®

Тел.: (495) 234-0636 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru

Реклама