

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОЦЕНКИ И МОНИТОРИНГА НАДЕЖНОСТИ АСДУ В ТРАНСПОРТЕ ГАЗА

Л.И. Григорьев, В.В. Калинин, В.Н. Русев,  
И.А. Седых (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина)

*Рассмотрены особенности разработки и практического применения информационно-аналитической системы оценки и мониторинга надежности АСДУ в транспорте газа. Предложена математическая модель оценки надежности функционирования и качества обслуживания газотранспортной системы (ГТС).*

*Ключевые слова: надежность, мониторинг, оценка надежности, управление техническим состоянием, учет отказов, интенсивность отказов.*

### Особенности решения проблемы надежности в современных системах управления

Наряду с экономическими и экологическими критериями надежность становится одним из важнейших критериев функционирования систем и процессов, причем интерес представляет надежность не только отдельных элементов, но и всей системы в целом. Роль показателей надежности в стремительно развивающейся теории рисков является еще одним подтверждением необходимости качественно нового взгляда на решение проблемы оценки надежности [1].

Проблемы управления развитием автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ) транспортом газа могут решаться только при условии работоспособности их технической части [2]. Следовательно, необходимо производить контроль технического состояния объекта управления и в первую очередь оценивать надежность функционирования газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и трубопроводной системы (ТС).

### Характеристика подсистемы оценки и мониторинга надежности в АСДУ

Оценка надежности в составе АСДУ газотранспортных предприятий носит фрагментарный характер и не позволяет диспетчеру создать целостное представление о надежности выполнения основных диспетчерских функций.

Предлагается создать и внедрить в составе АСДУ транспортом газа подсистему "Оценка и мониторинг надежности АСУТП (АСДУ)", которая должна представлять информационно-аналитическую систему, реализующую текущий контроль надежности выполнения ГТС базовых функциональных задач, обеспечивающую энергетическую безопасность и надежные поставки газа потребителям. Для этого в подсистеме: накапливается и консолидируется информация об отказах; по реальным данным оценивается интенсивность отказов и, в первую очередь, отказов активных технологических элементов, то есть ГПА и САУ ГПА. От оценок интенсивности отказов на базе актуальных статистических данных легко перейти к прогнозированию вероятности безотказной работы и планированию замены оборудования и проведению превентивных мероприятий в рамках управления состоянием технологического оборудования ГТС.

Основные цели создания подсистемы:

- сбор, ведение и представление характеристик надежности всех элементов, входящих в состав АСУТП (АСДУ) предприятия, включая уровни технологического оборудования, систем автоматики и телемеханики, ЧМИ (SCADA-система, прикладные программные средства и др.);

- сбор, ведение, архивирование и представление всей оперативной информации по отказам технологического оборудования, средств автоматического и автоматизированного управления;

- оценка надежности выполнения основных задач функционирования АСДУ ТП;

- прогнозирование характеристик надежности АСУТП с учетом надежности функционирования как технологического оборудования, так и систем автоматики и телемеханики;

- анализ и оценка влияния отказов отдельных элементов на надежность выполнения рассматриваемых функций, то есть оценка последствий отказов;

- статистическая оценка (на основе имитационного моделирования) границ временного интервала, на котором значение надежности рассматриваемых схем и систем, а также их элементов оказывается ниже заданного значения;

- формирование рекомендаций по замене оборудования, проведению планово-профилактических работ, резервированию отдельных элементов и др.

В настоящее время разработан прототип подсистемы оценки и мониторинга надежности. За период опытной эксплуатации системы в составе АСДУ газотранспортного предприятия была произведена настройка организационно-технологической структуры предприятия. На основании настроек технологической структуры были указаны все события, произошедшие с начала 2000 г. Для всех технологически активных элементов определены данные о состоянии наработки. Общий объем внесенных данных составил более 10 тыс. элементов.

Разработаны формы оперативной отчетности на основе данных по отказам и наработке технологического оборудования.

Рассматриваемая подсистема является необходимым компонентом системы управления (с обратной связью) надежностью функционирования ГТС (рис. 1). Пунктирной линией выделены те компоненты, кото-

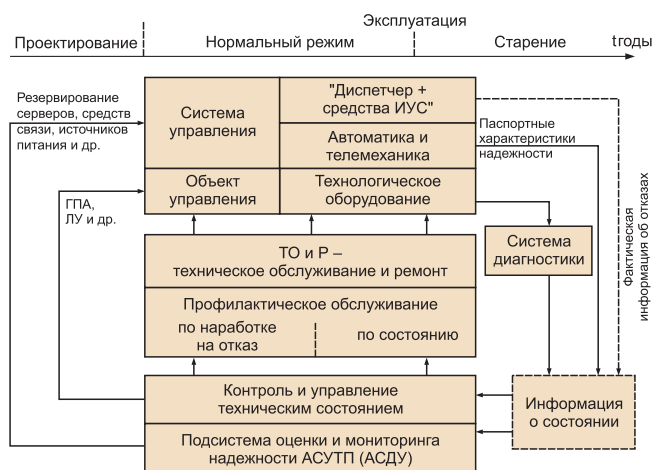


Рис. 1. Подсистема оценки и мониторинга надежности как составляющая системы управления техническим состоянием ГТС

рые сейчас отсутствуют: это подсистема оценки и мониторинга надежности АСУТП и БД, консолидирующая всю информацию об отказах технологически активных элементов ГТС.

Проблемы, связанные с обеспечением требуемой надежности, с контролем и управлением техническим состоянием, следует рассматривать на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) ГТС (отмечено временной осью на рис. 1).

Эффективность внедрения в практику работы диспетчерских служб ГТС подсистемы "Оценка и мониторинг надежности АСУТП (АСДУ)" зависит от того, насколько рационально организовано информационное и математическое обеспечение подсистемы и как полученные оценки надежности будут использованы при принятии управленческих решений.

В этом контексте важную роль играет организация математического обеспечения подсистемы, и, в частности, насколько ориентированы на конечный практический результат выбранные математические модели.

Особенности расчетов оценок надежности для объектов трубопроводного транспорта газа достаточно полно отражены в [3, 4].

**Математическое обеспечение подсистемы оценки и мониторинга надежности АСУТП (АСДУ) транспорта газа**

Выбор математических моделей зависит как от планируемого практического результата, так и от характера имеющейся информации. Например, если подсистема создается для уже функционирующего объекта, и статистика об отказах на начальном этапе ЖЦ отсутствует, то следует использовать модели оценки надежности по цензурированным выборкам [5, 6]. Если речь идет о только вводимом объекте, то могут быть использованы классические модели надежности [7].

Математическое обеспечение подсистемы включает классические математические модели оценки надежности и работоспособности элементов, модели цензурированных выборок и аппарат нечеткой логики. Для оценки надежности функционирования тех-

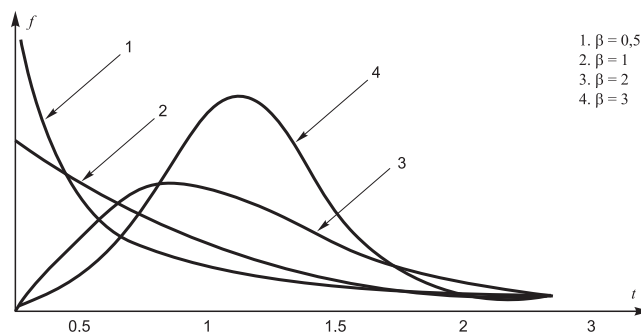


Рис. 2. Виды кривой плотности распределения Вейбулла-Гнеденко для некоторых значений параметров  $\beta$  (при  $\alpha = 0,5$ )

нологически активных элементов газотранспортных систем в подсистеме применяются классические математические модели.

Значимым аспектом настоящего подхода является решение этой проблемы с позиций жизненного цикла, где особое внимание уделяется этапу старения оборудования, а также системам контроля и мониторинга. Согласно ряду исследований показатели надежности ГТС на всех этапах жизненного цикла подчиняются двухпараметрическому распределению Вейбулла-Гнеденко [8].

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для количественной оценки надежности применяются количественные показатели оценки отдельных ее свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования технических объектов (в частности, электроустановок).

При исследовании оценок надежности систем автоматики в транспортировании газа широко применяются следующие базовые показатели надежности [7]: вероятность  $P(t)$  безотказной работы системы за время  $t$ , плотность  $f(t)$  распределения времени работы до отказа, а также интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

В качестве исходного показателя надежности, оценка которого производится на основе обработки собираемых статистических данных, удобней всего принять интенсивность отказов, так как:

- по известной интенсивности  $\lambda(t)$  несложно оценить остальные показатели надежности;
- функция  $\lambda(t)$  наглядно описывает все этапы ЖЦ функционирования объекта;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$  может быть легко определена экспериментальным путем.

Одним из ключевых распределений в теории надежности является распределение Вейбулла-Гнеденко, позволяющее охватить весь ЖЦ исследуемых на надежность объектов [5, 4, 7 и др.]. По результатам многих экспериментальных исследований кривая интенсивности отказов (согласно распределению Вейбулла-Гнеденко) имеет U-образный вид, при этом выделяют три основных периода ЖЦ: приработки (I), нормальной работы (II) и деградации (III) (рис. 3).

Если распределение времени до отказа подчиняется двухпараметрическому (с параметрами  $\alpha > 0, \beta > 0$ ) распределению Вейбулла-Гнеденко с плотностью

$$f(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{t^\beta}{\alpha}\right), & t > 0, \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

и функцией распределения

$$F(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{t^\beta}{\alpha}\right), & t > 0, \\ 0, & t \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

то показатели надежности работы системы – вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяются следующими выражениями:

$$P(t) = e^{-\frac{t^\beta}{\alpha}}, \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1}. \quad (3)$$

На рис. 2 изображены характерные виды кривой плотности распределения для некоторых значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , например,  $\alpha = 1$ , а  $\beta$  принимает значения 0,5; 1; 2; 3. Заметим, что за форму кривой плотности отвечает параметр  $\beta$ .

Распределение Вейбулла-Гнеденко позволяет аппроксимировать экспериментальную кривую интенсивности отказов на каждом из основных периодов функционирования системы [7]. В частности, период приработки отвечает распределению Вейбулла-Гнеденко с параметром  $\beta \in (0; 1)$ ; период нормальной эксплуатации – с параметром  $\beta \approx 1$  и период старения – с параметром  $\beta > 2$ . Это следует из исследования функциональной зависимости от параметров  $\alpha$  и  $\beta$  интенсивности отказов  $\lambda(t)$  (рис. 3).

В данной работе оценки параметров (1) и (2) двухпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко проведены по методу максимального правдоподобия. Дополнительный анализ методами классической математической статистики проводится для:

- проверки гипотезы о виде распределения (используется критерий согласия Колмогорова);
- проверки гипотезы об эргодичности (однородности) исходных статистических данных, то есть о сохранении закона распределения наблюдений в течение всего процесса получения экспериментальных данных.

Численный статистический анализ был проведен с использованием пакета Mathematica.

Для решения вышеперечисленных задач проведем линеаризацию по параметрам  $\alpha$  и  $\beta$ , дважды логарифмируя функцию распределения Вейбулла-Гнеденко (2):

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \ln \alpha. \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет для нахождения предварительных оценок параметров распределения Вейбулла-Гнеденко применить метод наименьших квадратов. Помимо этого линеаризованная зависимость (4) дает возможность проверки гипотезы согласия эмпирического распределения Вейбулла-Гнеденко.

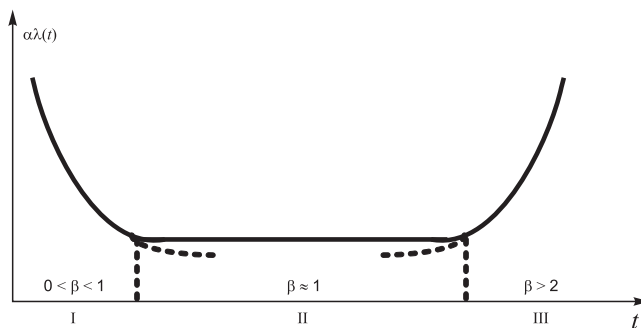


Рис. 3. Аппроксимация кривой интенсивности отказов распределением Вейбулла-Гнеденко (пунктирная линия)

Как правило, для прогнозирования надежности изделий в течение реальных сроков их эксплуатации используют данные цензурированных испытаний, при этом число реально наблюдавшихся отказов может быть невелико, что сильно ограничивает точность и надежность прогнозов. В этой связи возникает потребность в поиске более совершенных методов оценки надежности. Цензурированность (или усеченность) данных означает неполноту исходных эмпирических данных об отказах.

Рассмотрим модель однократно цензурированных слева выборок (участок I на рис. 3), когда время наблюдения за эксплуатацией фиксировано, а число отказов является случайной величиной. Усечение слева приходится применять из-за отсутствия предыстории реальных данных по отказам на объектах систем автоматического управления в транспортировке газа, которые были построены еще в советские времена.

Введем необходимые обозначения. Пусть  $n$  – первоначальный объем выборки;  $T_0$  – момент времени, начиная с которого фиксируются отказы в моменты времени  $t_k$ , ( $k = r + 1, \dots, n$ );  $r$  – число наименьших ненаблюдаемых (усеченных слева) элементов выборки.

Для однократно цензурированной слева выборки следует максимизировать функцию правдоподобия [6]:

$$L(\alpha, \beta) \sim \left(1 - e^{-\frac{T_0^\beta}{\alpha}}\right)^r \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{n-r} \cdot \prod_{k=r+1}^n t_k^{\beta-1} \cdot \exp\left\{-\frac{t_k^\beta}{\alpha}\right\},$$

то есть продифференцировать ее переменным  $\alpha$  и  $\beta$ , а полученные выражения приравнять к нулю. Таким образом, получаем:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sum_{k=r+1}^n t_k^\beta \ln \frac{T_0}{t_k}}{(n-r) \left( \ln T_0 - \frac{1}{\beta} \right) - \sum_{k=r+1}^n \ln t_k}, \\ \alpha (n-r) + \frac{r}{e^{T_0^\beta/\alpha} - 1} \cdot T_0^\beta = \sum_{k=r+1}^n t_k^\beta. \end{cases} \quad (6)$$

В случае нецензурированной выборки, соответствующей полной информации о работе АСДУ, функция правдоподобия принимает вид:

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{k=1}^n f(t; \alpha, \beta) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^n \cdot \prod_{k=1}^n t_k^{\beta-1} \cdot \exp\left\{-\frac{t_k^\beta}{\alpha}\right\}. \quad (7)$$

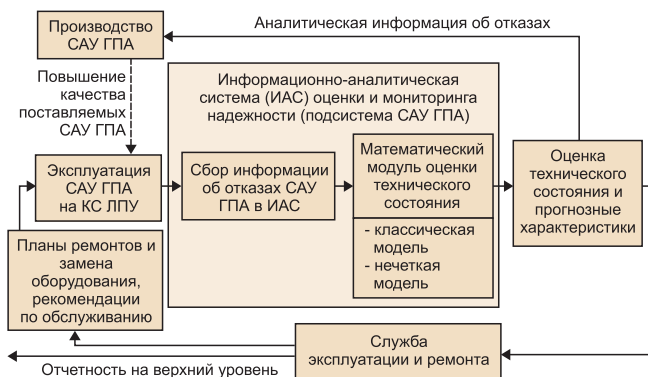


Рис. 4. Схема управления техническим состоянием, построенная на основе подсистемы оценки и мониторинга надежности

Удобнее рассматривать натуральный логарифм функции (7) как:

$$\ln L(\alpha, \beta) = n \ln \beta - n \ln \alpha + (\beta - 1) \cdot \sum_{k=1}^n \ln t_k - \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^n t_k^\beta \cdot (8)$$

Тогда уравнения правдоподобия записываются в виде:

$$\begin{cases} \frac{n}{\beta} + \sum_{k=1}^n \ln t_k - \frac{n}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta} \cdot \sum_{k=1}^n t_k^\beta \ln t_k = 0, \\ \alpha = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n t_k^\beta. \end{cases} (9)$$

В отличие от случая неполных данных система (9) распадается, то есть параметр  $\beta$  может быть определен из первого уравнения, а параметр  $\alpha$  — из второго уравнения системы. В результате несложных математических преобразований можно доказать, что решение (9) существует, и оно единственное.

Таким образом, рассмотрен комплекс моделей, позволяющих оценить интенсивности отказов по имеющейся статистической информации. На основании полученных оценок делается прогноз о техническом состоянии объекта, например, ГПА и САУ ГПА. Далее планируется комплекс профилактических работ или замена оборудования (рис. 4) [9].

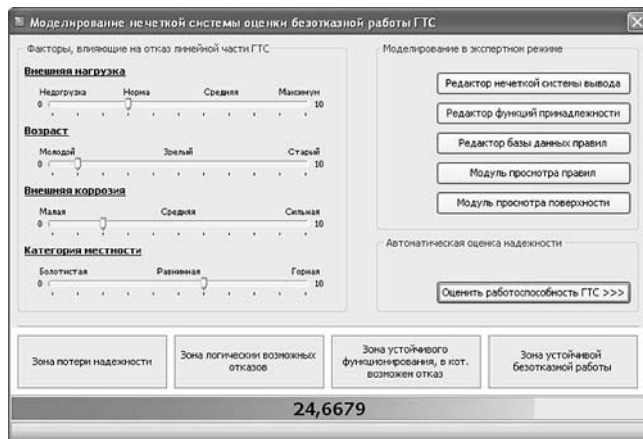


Рис. 5. Результат нечеткого моделирования оценки работоспособности ГТС в подсистеме оценки и мониторинга надежности

Введение в практику диспетчерских служб подсистемы оценки и мониторинга надежности АСУТП (АСДУ) открывает новые возможности для управления качеством. Например, может быть налажена обратная связь между эксплуатирующими организациями и производителями оборудования, в частности, ГПА и САУ ГПА, усиливается роль служб управления качеством на производстве. Оценки интенсивности отказов могут быть крайне полезны для повышения качества производства [2].

Кроме того, возникает возможность получения оценки технического состояния и уровня обслуживания эксплуатируемых систем.

Модель оценки работоспособности и качества обслуживания ГТС основывается на методах нечеткой логики и реализована в среде MATLAB с использованием пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox. Диспетчеру газотранспортного предприятия предоставляется возможность проведения в подсистеме оценки и мониторинга надежности моделирования безотказности работы ГТС. Пример нечеткого моделирования оценки работоспособности ГТС представлен на рис. 5.

**АСУТП системы вентиляции ТРЦ «Фантастика»**

Специалисты компании «ПрофАвтоматика» (г. Нижний Новгород) внедрили автоматизированную систему диспетчерского управления (АСДУ) общеобменной вентиляции в крупнейшем торгово-развлекательном центре (ТРЦ) "Фантастика" в г. Нижний Новгород. Новая АСДУ ТРЦ управляется при помощи SCADA TRACE MODE 6 (Россия). Аппаратный уровень системы вентиляции строится на основе щитов управления фирмы ВТС (Польша). В щитах располагаются контроллеры Siemens ACX 36.040. Связь с диспетчерским уровнем системы вентиляции под управлением SCADA TRACE MODE осуществляется по протоколу LON, через OPC-сервер NLOPC. ПО, разработанное в SCADA TRACE MODE, позволяет обслуживающему персоналу ТРЦ получать всю оперативную информацию о работоспособности системы и дистанционно управлять настройками систем вентиляции.

Система вентиляции ТЦ «Фантастика» выполняет следующие функции: автоматизация управления режимом работы (работа/останов/авария, работа по таймеру, зима/лето); автоматизация регулирования температуры воздуха в канале и удаляемого; мониторинг скорости вращения вентиляторов (в случае использования частотных регуляторов); мониторинг состояния всех исполнительных механизмов (работа/останов/авария); отображение архивных и текущих данных температур воздуха и воды на трендах; отображение архивных и текущих аварийных ситуаций системы (авария исполнительных устройств, загрязненность воздушных фильтров, обрыв связи с контроллером щита автоматики).

В настоящее время АСДУ расширяется. Компания ПрофАвтоматика проводит работы по подключению всей технологической вентиляции центра и расширению функций системы.

[Http:// www.adastra.ru](http://www.adastra.ru)

**Заключение**

Создание подсистемы "Оценка и мониторинг надежности АСУТП (АСДУ)" обеспечивает качественно новый уровень управления техническим состоянием технологических объектов, который определяется использованием как архивной, так и оперативной информации об отказах оборудования и систем автоматики для решения задач диспетчерского управления. Хотя рассмотренная система предназначена для АСУТП транспортировки газа в трубопроводных системах, возможности ее применения значительно шире. В свою очередь, новые возможности подсистемы оценки и мониторинга надежности определены разнообразными математическими моделями, позволяющими обрабатывать различные виды данных об отказах.

**Список литературы**

1. Григорьев Л.И., Кершенбаум В.Я., Костогрызлов А.И. Системные основы управления конкурентоспособностью в нефтегазовом комплексе. М.: НИИГ. 2010.
2. Григорьев Л.И. Автоматизированное диспетчерское управление – магистральное направление развития

*Григорьев Леонид Иванович – д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой автоматизированных систем управления,  
Калинин Василий Валерьянович – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой высшей математики,  
Русев Владимир Николаевич – старший преподаватель РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина,  
Седых Илья Анатольевич – директор департамента корпоративного управления ООО "РК Инжиниринг".*

*Контактные телефоны: (499) 233-93-04, (962) 939-45-69.  
E-mail: grigoriev.l@gubkin.ru, vm@gubkin.ru, ilya@sedyh.ru*

## МАЛЕНЬКИЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ БОЛЬШИХ ЗАДАЧ ИЛИ ПРОГРАММИРОВАНИЕ И СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ПЛК

М.В. Зайцев (ООО "Компэл-СПб")

*Предлагаем вниманию читателей серию статей, посвященных особенностям программирования контроллеров Phoenix Contact в универсальной среде PC WORX. Первая статья посвящена описанию среды PC WORX и ее конфигурированию для написания простейшей программы "СВЕТОФОР".*

*Ключевые слова: среда программирования, контроллер, имитатор.*

В серию Inline от компании Phoenix Contact входят контроллеры различного назначения. Среди них можно найти устройство для любого конкретного применения – от интеллектуального пускателя до многофункционального контроллера. Предлагаются контроллеры различного уровня производительности с/без поддержкой протокола Profinet I/O, с/без сертификации и т.д. Программирование всех контроллеров Phoenix Contact, в том числе и серии Inline возможно в универсальной среде PC WORX, известной также как Multiprog, компании KW-Software GmbH. Эта фирма не занимается выпуском ПЛК, ее основные цели – создание универсальной среды разработки, соответствующей стандарту IEC 61131-3, и адаптация к максимально большому числу производителей ПЛК.

При разработке ПО PC WORX внимание было сфокусировано на создании унифицированной среды разработки для контроллеров всех классов. Наряду с удобством для пользователя в PC WORX предусмот-

рена возможность повторного использования программ и функций. Интерфейс обеспечивает простой и быстрый обзор проекта. Использование окон упрощено за счет изображения их в форме рабочих книг. Прикрепляемые и открепляемые рабочие панели и конфигурируемые строки меню, которые можно легко настроить под требования любого пользователя, увеличивают эффективность программирования. Программа поддерживает следующие языки программирования, соответствующие МЭК 61131-3: лист инструкций (IL); функциональных блоковых диаграмм (FBD); релейных диаграмм (LD); редактор релейно-лестничной логики, фиксированный формат (FFLD); последовательных функциональных схем (SFC); язык структурированного текста (ST).

Программы на основных языках МЭК 61131 (LD, FBD и IL) могут свободно переписываться с одного языка на другой. Программный код, написанный в форме "структурированного текста", может быть в рамках соглашений МЭК переписан на один из трех