

Оценка надёжности АСУ форвардером на основе различных сетевых стандартов

М. Ю. Васенёв

Аннотация – В данной статье рассмотрены проблемы надёжности автоматизированной системы управления (АСУ) форвардером. Сформулированы некоторые понятия теории надёжности, определены методы её повышения. Приведено краткое описание различных промышленных сетевых стандартов (Profibus, CANopen, EtherCAT), а также их отличительные особенности, преимущества и недостатки. Рассмотрена типовая структурная схема АСУ форвардером, дана краткая характеристика каждого из её компонентов. Предложено использование раздельного резервирования для повышения надёжности системы, и обоснованы принципы этого выбора. Особое внимание уделено анализу результатов компьютерного моделирования для вычисления вероятности отказа/безотказной работы АСУ форвардером. Обоснованы выводы о лидерстве стандарта EtherCAT (по соотношению таких важных показателей, как цена/надёжность/производительность), что также доказывает целесообразность его применения в системах такого рода.

Ключевые слова – надёжность АСУ, промышленные сетевые стандарты, соотношение цена/надёжность/производительность, EtherCAT.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных лесозаготовительных машинах в настоящее время широко применяются автоматизированные системы управления (АСУ), позволяющие оператору эффективнее выполнять работу. Большое внимание в системах такого рода уделяется повышению надёжности. И эта *проблема* является, несомненно, *актуальной*, так как надёжность техники играет немаловажную роль при её функционировании (особенно в тяжёлых, экстремальных условиях леса).

Под экстремальными Ю.А. Ширнин и др. [1] понимают такие условия лесозаготовок, при которых:

- возрастает опасность получения травм рабочими и увеличивается нагрузка на элементы технологического оборудования;
- возникают препятствия, существенно снижающие проходимость и производительность лесосечных машин;
- невозможно использование типовых технологических схем разработки лесосек;
- затруднительно получение качественной продукции и др.

Целью данной статьи является оценка надёжности

АСУ форвардером под управлением различных сетевых протоколов: Profibus, CANopen, EtherCAT.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести компьютерное моделирование в ПО MathCAD;
- 2) оценить системы по таким показателям, как вероятность отказа/безотказной работы.

Сначала уточним некоторые термины. Что же понимается под термином «надёжность»? Под *надёжностью* понимают свойство объекта выполнять заданные функции в пределах требуемого промежутка времени и при соблюдении правил технического обслуживания. Соответственно, чем меньше число отказов, тем выше надёжность.

С термином «надёжность» непосредственно связаны понятия «работоспособность» и «отказ».

Работоспособность – состояние системы, при котором она способна выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями договорных обязательств и технической документации.

Отказ – полная или частичная утрата работоспособности системы.

Отказы в свою очередь делятся:

- *на внезапные (катастрофические)*, которые возникают в результате мгновенного изменения одного/нескольких компонентов системы (например, обрыв кабеля).

- *постепенные (параметрические)* – следствие изменения параметров компонентов системы (до полного отсутствия их работоспособности) с течением времени. Например, промокание кабеля, окисление соединений и т.д. [2].

Как уже было сказано выше, целью данной статьи является оценка надёжности АСУ форвардером под управлением промышленных сетевых протоколов Profibus, CANopen, EtherCAT. А каким образом можно повысить надёжность системы? По мнению И.В. Ефремова и Н.Н. Рахимовой [3], все методы повышения надёжности можно свести:

- к резервированию;
- уменьшению интенсивности отказов элементов сети;
- сокращению времени непрерывной работы;
- уменьшению времени восстановления;
- выбору рациональной периодичности и объёма контроля систем.

В данной статье подробнее будет рассмотрен способ повышения надёжности путём резервирования.

Статья получена 8 января 2018 г.

М.Ю. Васенёв – Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола (e-mail: AspIVS16.20@gmail.com).

II. ОПИСАНИЕ ПРОТОКОЛОВ

В настоящее время существует множество промышленных сетевых стандартов. Каждый из них обладает различной степенью надёжности. Для сравнения обратимся к следующим протоколам, функционирующим на основе различных алгоритмов: Profibus, CANopen, EtherCAT.

Кратко рассмотрим каждый из них.

Profibus является сетью с несколькими ведущими устройствами. Причём ведомые устройства не могут самостоятельно получить доступ к шине и только отвечают на запросы ведущего устройства. Profibus имеет различные модификации.

- **Profibus DP** использует физический и канальный уровни модели OSI, а также пользовательский интерфейс, который в модель OSI не входит. Непосредственный доступ из пользовательского приложения к канальному уровню осуществляется с помощью DDLM. Profibus DP в отличие от FMS и PA построен таким образом, чтобы обеспечить наиболее быстрый обмен данными с устройствами, подключенными к сети.

- **Profibus FMS** использует прикладной уровень модели OSI и применяется для обмена данными с контроллерами и компьютерами на уровне регистров. Profibus FMS предоставляет большую гибкость при передаче значительных объемов данных, но проигрывает протоколу DP в популярности вследствие своей сложности.

- **Profibus PA** использует физический уровень на основе стандарта IEC 1158-2, который обеспечивает питание сетевых устройств через шину и не совместим с RS-485. Особенностью Profibus PA является функционирование во взрывоопасной зоне [4].

CANopen. Для ускорения проектирования сетей на основе CAN и стандартизации их работы был разработан протокол высокого уровня CANopen.

Устройство в сети CANopen состоит:

- из интерфейса (к шине CAN) и программного протокола обмена, которые обеспечивают сервис по передаче и получению через сеть коммуникационных объектов;

- словаря объектов, описывающего типы данных, коммуникационные объекты и прикладные объекты, использованные в устройстве для обмена через интерфейс к устройствам ввода-вывода;

- интерфейса к устройствам ввода-вывода и прикладной программы [5].

CANopen имеет два базовых механизма передачи данных:

- 1) PDO – позволяет передавать данные в реальном времени (существует два типа PDO объектов: за передачу данных отвечает TPDO, за прием данных – RPDO);

- 2) SDO – доступ к словарю объектов.

EtherCAT. Это промышленный стандарт, базирующийся на сети Ethernet, обладающий гибкой топологией и простым конфигурированием, а также довольно низкой стоимостью аппаратных средств. Основные принципы данного сетевого стандарта

выглядят следующим образом [6]:

- протокол EtherCAT реализован на самом нижнем логическом уровне стека протоколов Ethernet. Структура телеграмм Ethernet и физический уровень интерфейса сохранены, что обеспечивает совместимость со стандартным сетевым оборудованием;

- аппаратная задержка на прохождение телеграммы через одно ведомое устройство составляет всего несколько наносекунд, благодаря её обработке «на лету». Таким образом, это позволяет максимально эффективно (на 80-97 %) использовать полосу пропускания канала передачи данных 100 Мбит/с;

- Сеть на основе EtherCAT не имеет ограничений относительно топологии. Возможность «горячего подключения» допускает подключение и отключение узлов или, например, целых участков во время работы.

III. СТРУКТУРА АСУ ФОРВАРДЕРОМ

Рассмотрим структурную схему АСУ, надёжность которой будет оцениваться (рис. 1).

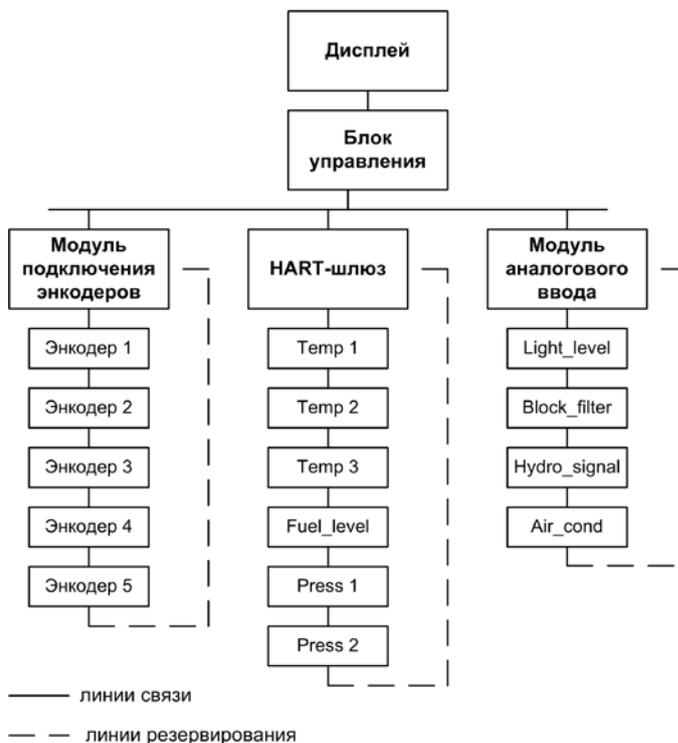


Рис. 1. Структура АСУ форвардером

Кратко представим характеристику каждого из компонентов.

- **Дисплей** – в его роли может выступать сенсорный/несенсорный (в данном случае потребуются дополнительный блок кнопок для навигации по меню) экран с защитой IPxx.

- **Блок управления** – это может быть промышленный ПК с необходимыми разъёмами или же компактный «классический» ПК с PCI-разъёмом для подключения master-устройства.

- **Модуль подключения энкодеров** – им может являться специализированный блок управления позиционированием и движением или терминал цифрового ввода.

- *HART-шлюз* – типовой шлюз для интеграции устройств HART в сеть с иным протоколом (например, для Profibus – GW-7577).

- *Модуль аналогового ввода* – терминал аналогового ввода.

Назначение остальных компонентов АСУ форвардером представлено в таблице 1.

Таблица 1

Компоненты автоматизированной системы управления форвардером

Обозначение	Назначение
Энкодер 1	Сообщает информацию о положении, угле колонны манипулятора
Энкодер 2	-\\- стрелы манипулятора
Энкодер 3	-\\- рукояти манипулятора
Энкодер 4	Показывает, насколько выдвинут удлинитель
Энкодер 5	Сообщает информацию о положении, угле захвата манипулятора
Temp 1	Датчик температуры двигателя
Temp 2	Датчик температуры трансмиссии
Temp 3	Датчик температуры охлаждающей жидкости
Fuel_level	Датчик уровня топлива
Press 1	Датчик давления насоса гидросистемы
Press 2	-\\- -\\- -\\-
Light_level	Датчик освещённости (для авт. вкл./выкл. фар, регуляции освещения в кабине, подсветки приборов и т.д.)
Block_filter	Датчик засорения фильтра на трубе воздухоочистителя (от дизельного двигателя)
Hydro_signal	Датчик-гидросигнализатор (для контроля уровня рабочей жидкости в баке)
Air_cond	Датчик контроля состояния воздуха в кабине

IV. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Согласно ГОСТ 27.002-2015 [7], *резервирование* – это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций.

Выделяют следующие типы резервирования:

- *постоянное* – резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений;

- *резервирование замещением* – функции основного элемента передаются резервному только при отказе основного элемента;

- *общее* резервирование – резервируется весь объект в целом;

- *раздельное* резервирование – резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

Для нашей задачи лучше всего подходит раздельное резервирование с постоянным включением резервных элементов. Достоинство его – постоянная готовность

резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. А недостатком является то, что резервный элемент тратит свой ресурс параллельно с основным [8]. Однако с учётом того, что интенсивность отказов экранированной витой пары находится в диапазоне $10^{-7} - 10^{-9}$, этот недостаток нивелируется. Например, в случае поражения оплётки с последующим поражением жил влагой/иной субстанцией или излома (что вероятно при работе в тяжёлых условиях леса) одного из кабелей его функционал перейдёт к другому.

V. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Оценка надёжности системы производится с помощью известного математического аппарата.

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в течение времени t .

Причём $P_i(t)$ определяется по формуле

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (2)$$

где λ_i – интенсивность отказа i -го элемента.

Вероятность отказа работы нерезервированной системы составит

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (3)$$

При раздельном резервировании вероятность безотказной работы при m -кратном резервировании равнонадёжных элементов находится по формуле

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N (1 - (1 - P_i(t))^{m+1}). \quad (4)$$

Основным параметром резервирования является *кратность*

$$m = (l - h) / h, \quad (5)$$

где l – общее число элементов устройства;

h – число резервируемых элементов, необходимых для функционирования устройства;

$l-h$ – число резервных элементов.

Вероятность отказа резервированной системы находится по выражению

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t). \quad (6)$$

Выигрыш в надёжности определяется по формуле

$$Wp = Q_c(t) / Q(t). \quad (7)$$

VI. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вычислительный эксперимент проводился в программном обеспечении MathCAD. В результате были получены следующие показатели (табл. 2).

Таблица 2

Вероятность безотказного функционирования системы*

Система	Profibus	CANopen	EtherCAT
<i>(наработка 1000 часов)</i>			
с резерв-ем	0.616	0.609	0.622
без резерв-ия	0.926	0.925	0.927
Выигрыш	5.19	5.199	5.15

Окончание таблицы 2

<i>(наработка 5000 часов)</i>			
с резерв-ем	0.088	0.084	0.093
без резерв-ия	0.419	0.413	0.423
Выигрыш	1.568	1.56	1.57
<i>(наработка 10000 часов)</i>			
с резерв-ем	$7.828 \cdot 10^{-3}$	$7.069 \cdot 10^{-3}$	$8.695 \cdot 10^{-3}$
без резерв-ия	0.098	0.095	0.101
Выигрыш	1.101	1.097	1.103

* элемент, имеющий наименьшую наработку на отказ – датчик уровня топлива «Технотон ДУТ-Е» (10000 часов).

Из данных таблицы видно, что результаты, продемонстрированные каждым из протоколов, являются примерно одинаковыми (графики также практически аналогичны). Проиллюстрируем это для протокола EtherCAT (рис. 2).

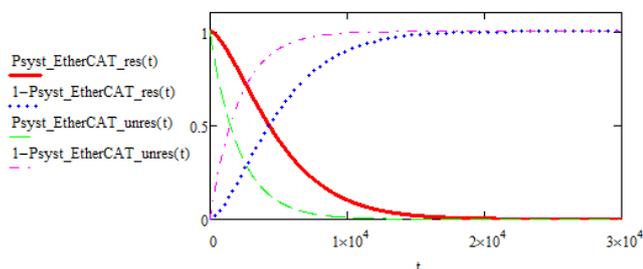


Рис. 2. EtherCAT: вероятности отказа и безотказной работы

Выигрыш в надёжности у АСУ (система с резервом/без), функционирующей на основе сравниваемых протоколов, также примерно аналогичен (рис. 3) и убывает со временем (т.к. с течением временем увеличивается вероятность отказа системы).

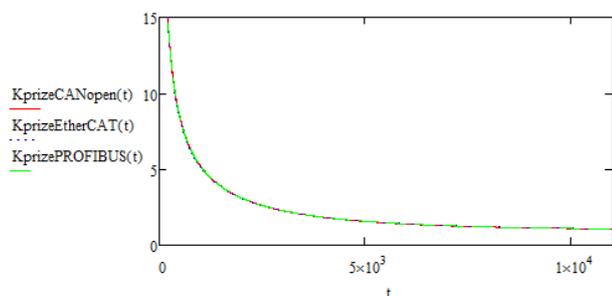


Рис. 3. Коэффициент выигрыша при резервировании

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подводя итоги, можно сказать, что все три промышленных сетевых протокола имеют примерно одинаковую надёжность, но выбор того или иного стандарта остаётся лишь за проектировщиком АСУ. Причём необходимо отметить, что промышленный стандарт EtherCAT, по нашему мнению, является наиболее предпочтительным для использования в АСУ

лесными машинами по соотношению таких важнейших показателей, как цена/надёжность/производительность. Это объясняется следующими факторами:

- Компоненты Profibus в низшей ценовой категории имеют меньшую надёжность в сравнении с EtherCAT/CANopen.

- Разработкой аппаратуры, функционирующей по протоколу CANopen, занимаются различные производители, например ICP DAS, что в дальнейшем может вызвать определённые проблемы с совместимостью. В то время как большую часть программного обеспечения и компонентов EtherCAT/Profibus разрабатывают компании Beckhoff и Siemens соответственно.

- Распространённость CANopen довольно мала за пределами Европы.

- EtherCAT обладает скоростью передачи 100 Мбит/с (CANopen – до 1 Мбит/с, Profibus – до 12 Мбит/с), что делает его одним из самых быстрых на рынке промышленных протоколов реального времени.

- Время реакции у протокола EtherCAT при любой нагрузке гарантировано, тогда как у CANopen большой поток приоритетных каналов может совсем «заблокировать» канал; это позволяет прийти к выводу о том, что CANopen не подходит для систем с жёстким реальным временем.

- Готовые Profibus slave-модули обладают довольно высокой стоимостью в сравнении с EtherCAT/CANopen.

- На текущий момент протокол EtherCAT обладает очень серьёзной поддержкой разработчиков программного обеспечения (часть ПО – open-source) и компонентов, что гарантирует его актуальность на длительный период времени (например, Siemens сейчас уделяет большее внимание Profinet, а не Profibus).

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю. Пути решения проблем лесозаготовок в экстремальных условиях // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 2 (22).
- [2] Понятие надёжности сети [Электронный ресурс]. – URL: <https://nag.ru/articles/reviews/15500/ponyatie-nadejnosti-seti.html>. (дата обращения 10.12.2017).
- [3] Ефремов И.В, Рахимова Н.Н. Надёжность технических систем и техногенный риск. – Оренбург: ОГУ, 2013.
- [4] Промышленная сеть Profibus [Электронный ресурс]. – URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter2_7.aspx (дата обращения 15.12.2017).
- [5] Протокол CAN [Электронный ресурс]. – URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter2_6.aspx (дата обращения 15.12.2017).
- [6] EtherCAT– технология будущего [Электронный ресурс]. – URL: <http://controlengrussia.com/bezopasnost/ethercat-tehnologija-budushchego/> (дата обращения 15.12.2017).
- [7] ГОСТ 27.002-2015 Надёжность в технике. Термины и определения – Москва: Стандартинформ, 2015. – 28 с.
- [8] Надёжность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.А. Пучков и др. – М.: Деловой экспресс, 2002. – с. 368.

Reliability evaluation of forwarder's ACS based on various network standards

M. Vasenev

Abstract – This paper considers the problems concerned with the subject as forwarder's automated control system (ACS) reliability. There are formulated certain notions of the redundancy theory, described methods of its improving. There are given short descriptions of the various industrial network standards (Profibus, CANopen, EtherCAT), as well as their distinguishing features, advantages, and disadvantages. The typical ACS' structure chart is considered, brief characteristic of each its components is defined. Particular attention is devoted to the analysis of computer modeling results for probability's calculating failure/no-failure operation of forwarder's ACS. There are justified conclusions of EtherCAT's leadership in terms of (cost/reliability/performance ratio), that also proves the suitability of its application in such systems.

Keywords – ACS reliability, industrial network standards, cost/reliability/performance ratio, EtherCAT.