

УДК 621.3.019.34

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. Г. КАПУСТИН, О. Г. КАРАЧУН

*Белорусская государственная академия авиации,
г. Минск*

Ключевые слова: техническая диагностика, диагностируемый параметр, система электроснабжения, состояние системы, воздушное судно, принципы диагностики, логическая модель.

Введение

Известно, что задачей мировой авиации является разработка и введение в эксплуатацию воздушного судна по концепции «All electric aircraft» (полностью электрический самолет). Цель концепции – усовершенствование аэродинамики, эффективности силовой установки, конструкции воздушного судна, технологичности, надежности, а также повышения летно-технических характеристик [1].

Элементы этой концепции внедряются на борт воздушного судна постепенно по мере разработки тех или иных вопросов. В настоящее время воздушные суда с элементами концепции «All electric aircraft» носят название самолета с полностью электрифицированным оборудованием (СПЭО). На таких воздушных судах все бортовые системы работают, используя только электроэнергию, полностью исключены системы, которые для своей работы требуют гидро-, пневмо- и другие виды энергии. К эксплуатируемым воздушным судам типа СПЭО относят самолеты A380, Boeing 747 Dream liner, Boeing 777, A400M, A300-600 Beluga и др. [1]. Однако с увеличением электрификации СПЭО усиливаются мощность и роль системы электроснабжения и, как следствие, возрастает количество электрических компонентов и систем на борту воздушного судна [1]. Это приводит к повышению вероятности возникновения отказов в системе электроснабжения, что, в свою очередь, требует решения задач диагностирования и локализации неисправностей (отказов) электрических компонентов системы.

Актуальность разработки эффективных подходов и методов для решения задач диагностики подтверждается тем фактом, что в современной авиации до 80 % материальных средств расходуется на устранение отказа и до 20 % – на их обнаружение. Таким образом, своевременное диагностирование предпосылок отказов экономит до 80 % всех материальных средств.

Основная часть

В настоящее время диагностика всей системы электроснабжения (СЭС) как единого целого не проводится и сделать заключение об отказе именно СЭС может только специалист, проводящий мероприятия по диагностике на основании информации об отказе в одном из компонентов, входящего в состав СЭС. Однако такой подход имеет существенный недостаток – при возникновении отказа в подсистеме, которая не диагностируется, делается ошибочное заключение об отказе системы, которая в целом является неисправной, но работоспособной [2], [3].

Диагностика всех систем на борту воздушного судна осуществляется методом встроенного контроля с использованием сети контроллеров, соединенных в CAN-сеть (рис. 1). На борту воздушного судна расположен специальный разъем для подключения внешнего устройства считывания и воспроизведения информации. При возникновении отказа в системе электроснабжения диагностика и локализация места отказа производится с демонтажем всех компонентов системы и проверки их в отдельности, так как может произойти каскад отказов, который из-за особенностей данного подхода диагностики не определяется [3], [4]. Также с использованием данного подхода исключается предупреждение отказов, связанных с выходом выходного сигнала компонента системы за зону допустимых значений для других, функционально зависимых от него, блоков и агрегатов в системе.

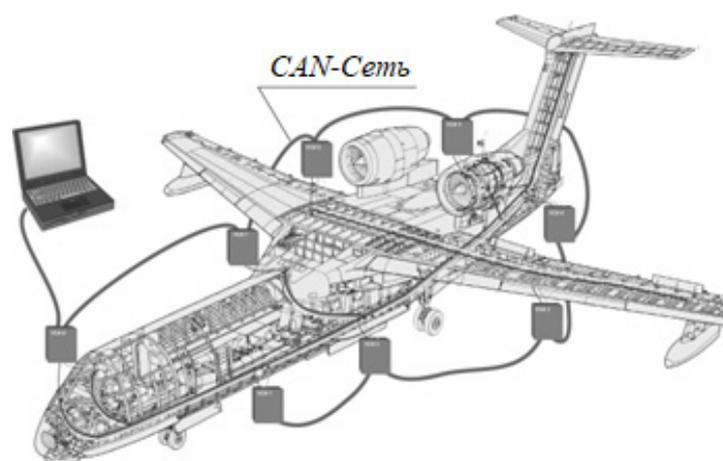


Рис. 1. CAN-сеть на борту воздушного судна

Целью работы является разработка подхода к диагностике системы электроснабжения перспективного воздушного судна методом встроенного контроля на основе цифровой системы, диагностирующей систему электроснабжения как единое целое [1], [3].

Разработка предлагаемого подхода включает в себя следующие этапы:

- условное определение функциональных уровней;
- определение причинно-следственных связей между уровнями;
- определение зон допустимых значений для выходных сигналов каждого уровня;
- определение возможных состояний системы;
- формирование уравнения булевой функции.

Для определения причинно-следственных связей системы электроснабжения использовалась система электроснабжения без резервирования современного воздушного судна типа СПЭО (рис. 2).

Для разработки и моделирования алгоритма схема (см. рис. 2) разбивается на шесть условных уровней. Первый уровень включает авиационный двигатель и моделируется простым построителем сигналов. Второй уровень – это система генерирования электроэнергии. Третий уровень – система первичного распределения электроэнергии в составе датчиков тока и напряжения и контакторов, управляемых блоком генератора. Четвертый уровень – это вторичная система распределения электроэнергии. Пятый уровень представляет собой нагрузки переменного тока. Шестой уровень включает в свой состав нагрузки постоянного тока: резистивные нагрузки, двигатель постоянного тока, блок трансформаторов и выпрямитель.

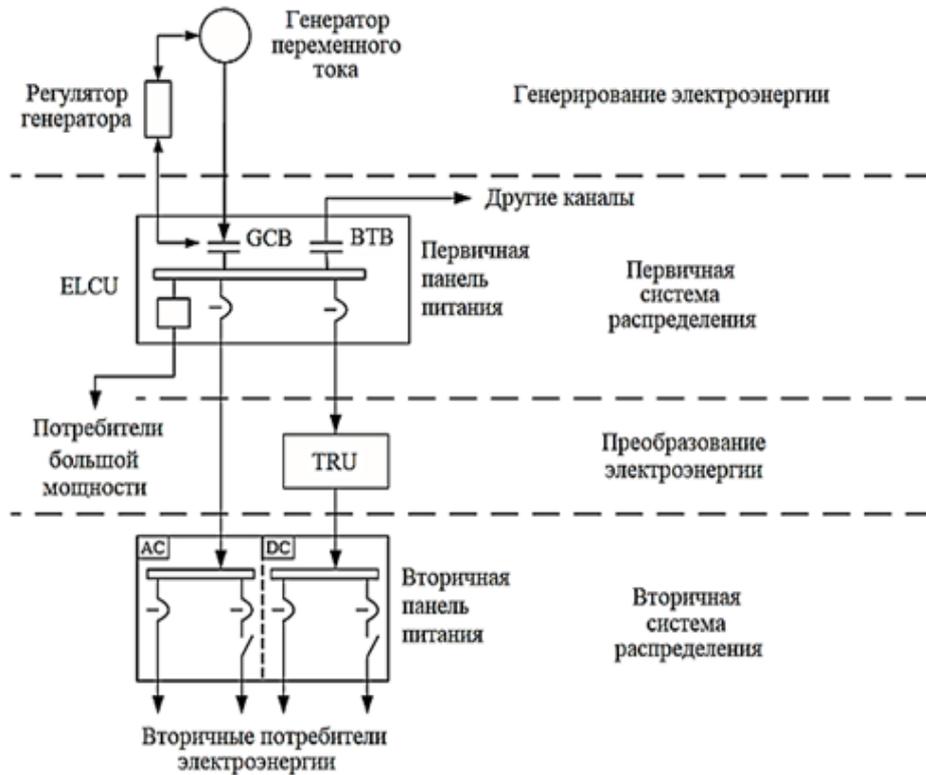


Рис. 2. Схема системы электроснабжения воздушного судна

Для дальнейшей разработки алгоритма диагностирования отказов построена формализованная структурная схема системы электроснабжения (рис. 3).

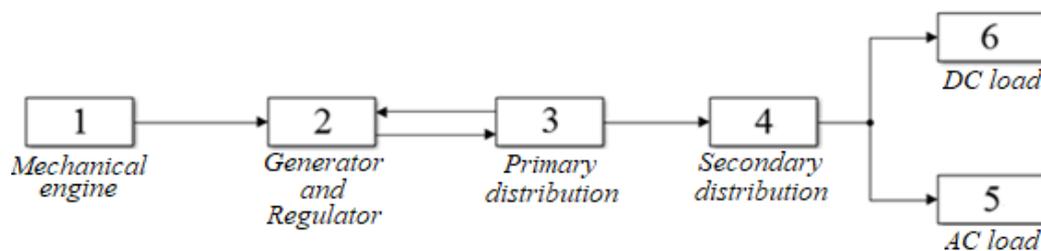


Рис. 3. Структурная схема системы электроснабжения

На структурной схеме блоками с номерами обозначены условно выделенные уровни системы электроснабжения, а стрелками – выходные сигналы каждого блока, которые являются входными сигналами для других, функционально связанных с ними блоков.

Авиационный двигатель (Mechanical engine) и генератор переменного тока с регулятором (Generator and regulator) связаны посредством механического привода (на рис. 3 не показан). На схеме эти связи изображены последовательно. Таким образом, если выходной сигнал авиадвигателя входит в область недопустимых значений генератора, то дальнейшая работа генератора также будет некорректной и на его выходе появится сигнал из области недопустимых значений.

Причинно-следственные связи между компонентами системы представлены в виде графа на рис. 4. Вершина, из которой выходит стрелка, является причиной, а вершина, к которому подходит стрелка, является следствием отказа. Исходя из этого,

отказ авиадвигателя влечет за собой отказ генератора; отказ генератора или регулятора вызывает отказ в системе первичного распределения; отказ в системе первичного распределения обуславливает отказ в системе вторичного распределения; отказы в нагрузке переменного и постоянного тока являются следствием отказа в системе вторичного распределения. Следует отметить, что отказ в системе первичного распределения вызывает отказ генератора или регулятора напряжения, так как они связаны обратной связью. Следовательно, каждый компонент «отвечает» за отказ в уровне, следующем за ним в структурной схеме (рис. 4). Исключением является система первичного распределения, отказ в которой приводит еще и к отказу в уровне, предшествующем ей.

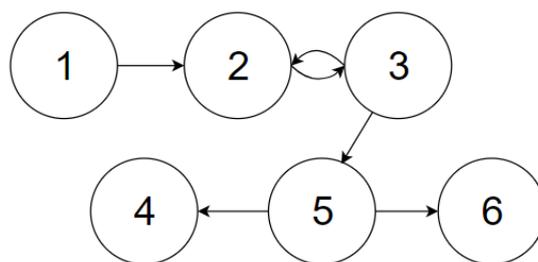


Рис. 4. Граф причинно-следственных связей

Так как все электрические компоненты системы электроснабжения могут находиться только в одном из двух несовместных состояний – 1 (работоспособное) и 0 (неработоспособное), то следует определить соответствие состояний данных в цифровой системе (1, 0) данным о техническом состоянии компонентов выделенного уровня. Выходной сигнал каждого уровня может иметь только два значения: 1 или 0. Единица соответствует выходному сигналу, который находится в области допустимых значений, ноль – сигналу из области недопустимых значений [2]–[4]. Следует отметить, что область допустимых значений для выходного сигнала предшествующего блока не охватывает всю область допустимых значений для входного сигнала последующего блока. Диаграмма распределения областей допустимых значений изображена на рис. 5.

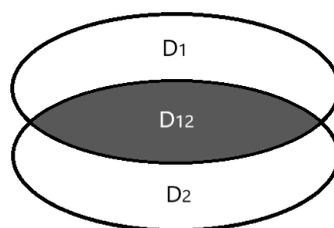


Рис. 5. Область допустимых значений

На рис. 5 приняты следующие обозначения: D_1 и D_2 – области допустимых значений выходного и входного сигнала двух блоков, соответственно; D_{12} – общая область допустимых значений, применяемая для определения значения состояния выходного сигнала. Таким образом, если выходной сигнал попадает в условную закрашенную область, то он находится в области допустимых значений, и отказов в системе нет [4]. На основании этого заключения составлена таблица состояний системы электроснабжения (СЭС). Так как состояния S_6 и S_7 являются неразличимыми, строки, соответствующие этим состояниям, – одинаковые, и поэтому таблица принимает следующий вид (табл. 1).

Объединенная таблица состояний СЭС

Номер состояния	Значения выходных сигналов					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
S_1	1	1	1	1	1	1
S_2	1	1	1	1	1	0
S_3	1	1	1	1	0	1
S_4	1	1	1	1	0	0
S_5	1	1	1	0	0	0
S_6	1	0	0	0	0	0
S_7	0	0	0	0	0	0

В таблице приняты следующие обозначения: S_i – номер состояния; x_n – выходной сигнал n -го блока системы электроснабжения (см. рис. 3).

На основании табл. 1 составлено уравнение булевой алгебры, однозначно определяющее все возможные состояния СЭС, соответствующие отказам. Это позволяет реализовать логическую модель работы предлагаемой системы диагностирования. С помощью логической модели упрощается написание программного кода микроконтроллера, на котором реализуется разрабатываемая система. Уравнение булевой алгебры выглядит следующим образом:

$$Z_s = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_6) = (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge X_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge X_6) \vee \\ \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee \\ \vee (\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6),$$

где Z_s – выходной сигнал системы диагностирования; φ – функция, объединяющая зависимости состояний системы и значения выходных сигналов каждого компонента системы электроснабжения.

По уравнению булевой алгебры составлена логическая модель диагностирования технического состояния системы электроснабжения (рис. 6).

Информация о состоянии системы электроснабжения при использовании данной модели (см. рис. 6) представляет собой параллельный код. Таким образом, данная модель (см. рис. 6) позволяет индцировать возникновение отказа в СЭС.

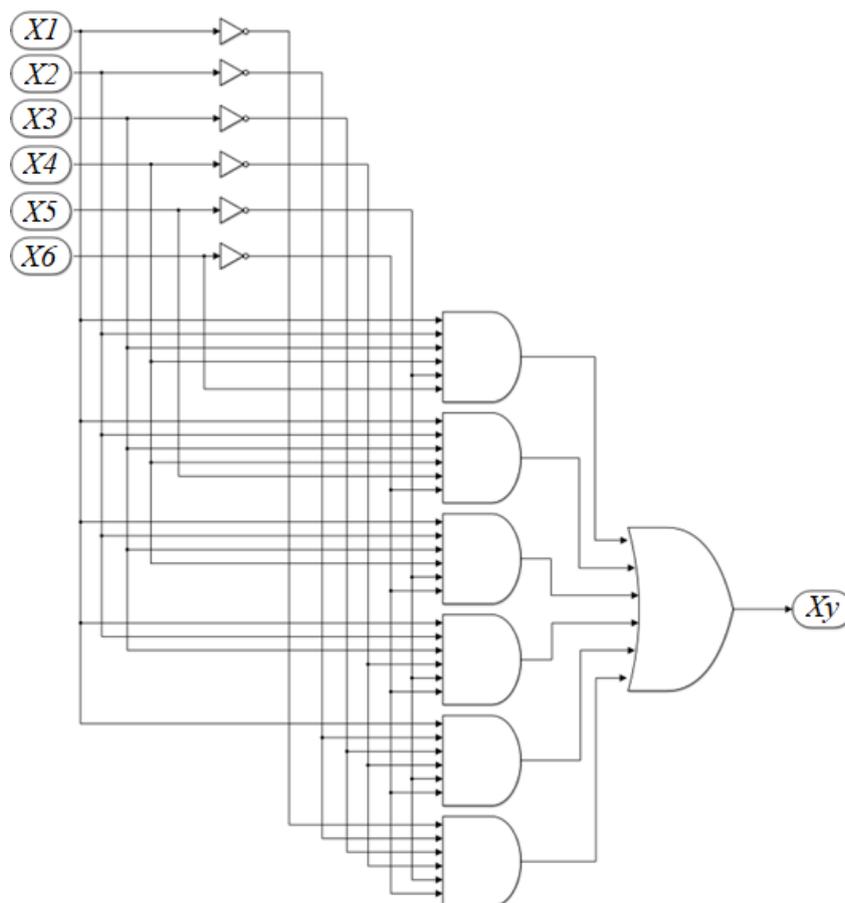


Рис. 6. Логическая модель системы диагностирования

Для определения места отказа следует использовать сдвиговый регистр (табл. 2), чтобы преобразовать параллельный код в последовательный [3]. Следовательно, определяя вид последовательного кода, можно утверждать о работоспособном или неработоспособном состоянии системы, т. е. выявить уровень, на котором произошел отказ.

Таблица 2

**Таблица истинности сдвигового регистра
для диагностики системы электроснабжения**

Значение диагностируемого сигнала						Выходной сигнал		Значение состояния
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Z_2	Z_{10}	
1	1	1	1	1	1	111111	63	S_0
1	1	1	1	1	0	111110	62	S_1
1	1	1	1	0	1	111101	61	S_2
1	1	1	1	0	0	111100	60	S_3
1	1	1	0	0	0	111000	56	S_4
1	0	0	0	0	0	100000	32	S_5
0	0	0	0	0	0	000000	0	S_6

Диагностическая система достаточно легко реализуется на интегральных микросхемах [3]. Немаловажным достоинством является то, что возможна реализация данного алгоритма диагностирования с помощью нанотранзисторов, что значительно

сократит объем и габариты системы диагностирования и открывает возможности внедрения данного алгоритма в наносистемы.

Для эффективной работы системы диагностирования, учитывая особенности функционирования системы генерирования электроэнергии (см. рис. 3, уровень 2), система диагностирования должна проводить диагностику уровней системы электроснабжения через интервалы времени значительно меньше 0,1 с. Это позволит практически мгновенно выявлять отказы, получая возможность создания практически безынерционной системы защиты системы электроснабжения и ее компонентов.

Информация, получаемая от системы диагностирования, может быть использована для построения защиты системы электроснабжения от аварийных ситуаций, например, защиты от коротких замыканий, чрезмерного повышения напряжения и др. Для этого определены компоненты резервированной системы, отказы в которых соответствуют неразличимым состояниям и охвачены обратной связью. Для определения состава системы защиты генератор и система первичного распределения электроэнергии (см. рис. 1) объединены в один блок с общим входным и выходным сигналами. Тогда структурная схема СЭС примет вид как на рис. 6.

Предложенная структура системы определяет только отказы, связанные с неисправностями в электрических компонентах системы электроснабжения. При этом учитывалось, что авиационный двигатель (уровень 1) связан с генератором (уровень 2) с помощью механического привода, который не является электрическим компонентом. Следовательно, авиационный двигатель не относится к объектам защиты для предлагаемой системы защиты.

Обобщенная структурная схема системы электроснабжения с безынерционной защитой представлена на рис. 8.

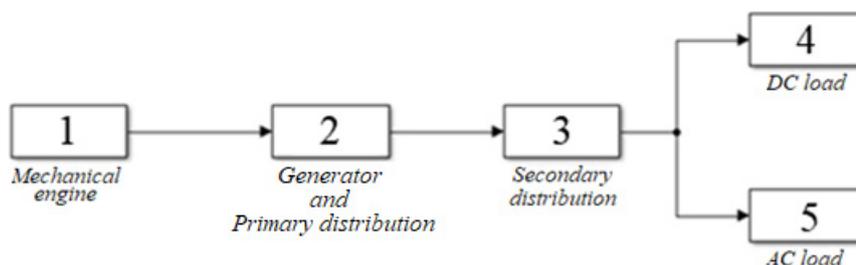


Рис. 7. Обновленная структурная схема система электроснабжения

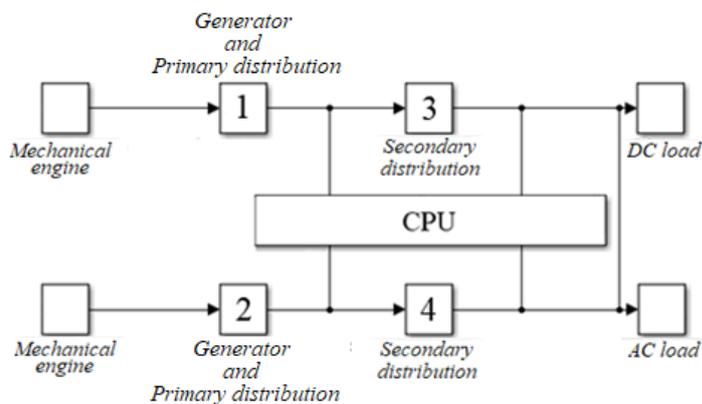


Рис. 8. Система электроснабжения с инновационной системой защиты

Компоненты системы электроснабжения резервированы между собой поперечными линиями резерва (ранее применялось только продольное резервирование). По линиям поперечного резервирования центральный процессор CPU получает информацию о текущем состоянии любого компонента и системы в целом. При возникновении отказа в одном из компонентов формируется команда отказа поврежденной цепи и переключения приемников электроэнергии на дублирующую ветвь.

Заключение

Таким образом, выделяя функционально значимые уровни системы электроснабжения, несложно сформировать алгоритм диагностики системы, позволяющий получать необходимую информацию о состоянии системы в целом и локализации места отказа. Работоспособность алгоритма подтверждена имитационным моделированием в среде Matlab. Система диагностики, функционирующая на основе разработанного алгоритма (см. рис. 8), проводит «опрос» всех компонентов системы электроснабжения на предмет отказов за промежуток времени, равный 0,1 с, что на порядок меньше, чем у существующих бортовых систем. Представленный алгоритм позволяет довольно легко реализовать на интегральных схемах, микросхемах (ATmega) систему диагностики и защиты системы электроснабжения, что является неоспоримым преимуществом перед эксплуатируемыми системами встроенной диагностики, которые представляют собой сложную систему вычислительных устройств (см. рис. 1) [1], [3].

Литература

1. Обзор разработок полностью электрических самолетов / Е. Е. Тулинова [и др.] // Электричество. – 2016. – № 4. – С. 15–25.
2. Схиртладзе, А. Г. Надежность и диагностика технологических систем / А. Г. Схиртладзе. – М. : Новое знание, 2008. – 518 с.
3. Мержи, И. Практическое руководство по логическим микросхемам и цифровой схемотехнике / И. Мержи ; пер. с англ. Ю. Соколова. – М. : НТ Пресс, 2007. – 256 с.
4. Карачун, О. Г. Формирование диагностических признаков короткого замыкания авиационного генератора переменного тока / О. Г. Карачун, А. Г. Капустин / Междунар. молодежн. сб. науч. ст., Россия, г. Липецк, 26 апр. 2019 г. / отв. ред. А. В. Горбенко. – Липецк : Научн. партнерство «Аргумент», 2019. – Ч. I. – 216 с.

Получено 08.01.2020 г.