

## ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОАГРЕГАТА

В.Г. СУГАКОВ, д-р техн. наук, Ю.С. МАЛЫШЕВ, асп.

**Рассмотрены аспекты построения логических моделей судовых источников электроэнергии в целях решения задач автоматического управления и описан пример построения логической и структурной модели судового электроагрегата.**

*Ключевые слова:* автоматическая система управления, логическая модель, судовой генератор, структурирование объекта.

### LOGICAL MODEL OF SHIP ELECTRICAL UNIT

V.G. SUGAKOV, Doctor of Engineering, Yu.S. MALYSHEV, Post Graduate Student

**The article describes the construction aspects of logic models of electric power ship sources to solve the automatic control problems. The authors give the example of construction of logic and structural model of a ship electrical aggregate.**

*Keywords:* Automatic control system, logical model, ship generator, object structurization.

В процессе разработки системы автоматического управления электростанцией одним из наиболее важных этапов является разработка логической модели. На этом этапе разработки необходимо обратить внимание на разделение входных сигналов по их функциональному назначению или физической природе, определяющих функциональные связи между составными частями источника электроэнергии.

Функциональные связи между составными частями источника электроэнергии (ИЭЭ) устанавливаются на основании структурных моделей. Обычно при делении на элементы структурных моделей используют принцип функциональной близости [1], заключающийся в том, что при определении внутреннего содержания объекта в нем собирают элементы, работающие на формирование общего выходного сигнала на одном выходе. При этом рассматриваются сигналы одной природы. В комбинированных системах, какой является ИЭЭ, наличие разнородных сигналов и конструктивное исполнение деталей и узлов в большинстве случаев не позволяют использовать принцип функциональной близости.

Для структурирования объекта каждого уровня использован принцип конструктивно-функциональной близости [2], предполагающий конструктивное единство и разделение входных сигналов по функциональному назначению или физической природе сигналов. При этом сигналы рассматриваются как логические (бинарные) функции, принимающие значения логической единицы либо логического нуля. Сигналы могут обозначать потоки энергии, жидкости, газов, электрический ток или напряжение и т. д.

Совокупность элементов с их связями, объединенных функциональной общностью, образует структурную модель объекта. Взаимодействие элементов осуществляется посредством внутрисистемных и межсистемных связей.

Связи указываются линиями со стрелкой на конце по направлению передачи сигнала от

выхода одного элемента к входу другого. Над линией указывается адрес выхода (выходной параметр), а под линией – адрес входа (входной параметр).

Входные параметры элемента имеют в обозначении букву Z, а выходные – X. Первое число индекса указывает номер объекта, второе – порядковый номер его элементов, а третье – номер выхода (входа) элемента. Выходные параметры объекта имеют обозначение в виде буквы У с двухчисловым индексом. Первое число индекса соответствует номеру объекта, а второе – номеру его выхода. Входные сигналы элементов от системы автоматического управления (САУ) обозначены буквой W с двухчисловым индексом, указывающим номер объекта и номер его элемента соответственно.

Структурные модели служат основой для создания логических моделей, являющихся совокупностями бинарных уравнений функционирования, которые дают обширную информацию в аналитическом виде при рассмотрении работы или структуры объекта.

Разделение сигналов выполняется лишь на уровне элементов объекта. Они в совокупности с соответствующими связями образуют многомерные (по числу типов физической природы сигналов) направленные графы, показывающие путь прохождения по элементам сигналов.

Связи между элементами в границах объекта описываются уравнениями внутрисистемной связи, показывающими, с каким входом какого элемента связан данный вход данного элемента. Уравнения внутрисистемной связи в общем случае имеют вид

$$Z_{k-l-m} = \sum_1^n X_{k-j-i},$$

где  $\Sigma$  – здесь и далее по тексту обозначает логическую сумму (дизъюнкцию) логических функций;  $k$  – признак (номер) объекта, в пределах которого находится данная связь;  $l, j$  – признаки (номера) соединяемых элементов объекта;  $m, i$  – признаки

(номера) соединяемых входов соответствующих элементов;  $n$  – число однородных входных сигналов, поступающих на вход с номером  $m$ . Однородными считаются сигналы, имеющие одинаковую физическую природу.

Зависимость выходного сигнала (параметра) от состояния элемента и значений входных сигналов описывается логическим уравнением функционирования элемента. Структура уравнения зависит от числа функционально-связанных входов элемента и логики его работы. В общем случае логическое уравнение функционирования имеет вид

$$X_{k-v-l} = \omega_{k-v} \sum_{j=1}^{j=n} \left( \prod_{i=1}^{i=m} Z_{k-v-i} \right)_j,$$

где  $\Pi$  – здесь и далее по тексту обозначает логическое произведение (конъюнкцию) логических функций;  $n$  – число однородных сигналов, формирующих выходной сигнал;  $m$  – число групп функционально связанных неоднородных сигналов;  $i$  – текущий номер однородного сигнала,  $i = 1 \dots n$ ;  $j$  – текущий номер группы неоднородных сигналов,  $j = 1 \dots m$ ;  $k$  – признак объекта;  $v$  – признак элемента;  $l$  – признак выхода элемента;  $\omega_{k-v}$  – логическая функция состояния  $v$ -го элемента  $k$ -го объекта.

Рассмотрим построение логической модели на примере судового генератора. Генератор (Г) может иметь два собственных элемента: основную электрическую машину и возбудитель.

Структурная модель основной электрической машины (рис. 1,а) содержит следующие элементы: вал 1; передний 2 и задний 4 подшипниковые щиты; передний 3 и задний 5 подшипники; траверсу 6; щеткодержатель 7; щетки 8; сталь 9 и обмотку 10 индуктора; выпрямитель 11 питания индуктора; сталь 12 и основную 13 и дополнительную 14 обмотку якоря; корпус 15 и контактные кольца 16; устройство начального возбуждения 17 (постоянные магниты или коммутационный аппарат для подключения аккумуляторной батареи); элементы тепловой защиты 18 и защиты от перенапряжений 19; устройство гашения поля 20 и соединение вала генератора с двигателем 21.

Уравнения связи и функционирования элементов с указанием физической природы выходных сигналов приведены в таблице.

Внешние связи основной электрической машины осуществляются по пяти входным параметрам:  $Y_{5-1}$  – по которому происходит передача вращающего момента от ПД;  $Y_{16-1}$  – передается механическое усилие от возбудителя на корпус основной машины;  $Y_{16-2}$  – производится питание индуктора от возбудителя;  $W_{15-17}$  и  $W_{15-20}$  – из САУ производятся начальное возбуждение и гашение поля соответственно.

Приведенная на рис. 1,б структурная схема основной машины получена путем поглощения

внутрисистемных связей. Она имеет пять выходных параметров, которые описывают:

- механическое усилие на корпус ПД

$$Y_{15-1} = X_{15-15-1}; \quad (1)$$

- напряжение, поступающее от дополнительной обмотки якоря в цепи регулирования напряжения

$$Y_{15-2} = X_{15-14-1}; \quad (2)$$

- сигнал в САУ от элемента тепловой защиты

$$Y_{15-3} = X_{15-18-1}; \quad (3)$$

- напряжение основной обмотки якоря, поступающее в силовые цепи,

$$Y_{15-4} = X_{15-13-1}; \quad (4)$$

- крутящий момент для привода возбудителя

$$Y_{15-5} = X_{15-1-4}. \quad (5)$$

С учетом уравнений функционирования и связей, которые можно написать для каждого элемента, равенства (1)–(5) принимают следующий вид:

$$Y_{15-1} = Y_{16-1} \omega_{15-1} \omega_{15-2} \omega_{15-3} \omega_{15-4} \omega_{15-5} \omega_{15-6} \wedge \omega_{15-7} \omega_{15-8} \omega_{15-9} \omega_{15-10} \omega_{15-11} \omega_{15-12} \wedge \omega_{15-13} \omega_{15-14} \omega_{15-15} \omega_{15-16}; \quad (6)$$

$$Y_{15-2} = Y_{15-2}^{(1)} \vee Y_{15-2}^{(2)}, \quad (7)$$

где  $Y_{15-2}^{(1)}$  – напряжение дополнительной обмотки после возбуждения:

$$Y_{15-2}^{(1)} = \bar{W}_{15-20} Y_{5-1} Y_{16-2} \omega_{15-1} \omega_{15-8} \omega_{15-9} \wedge \omega_{15-10} \omega_{15-11} \omega_{15-14} \omega_{15-19} \omega_{15-20} \omega_{15-21}; \quad (8)$$

$Y_{15-2}^{(2)}$  – напряжение дополнительной обмотки при начальном возбуждении:

$$Y_{15-2}^{(2)} = \bar{W}_{15-20} W_{15-17} Y_{5-1} \omega_{15-1} \omega_{15-9} \wedge \omega_{15-10} \omega_{15-14} \omega_{15-17} \omega_{15-20} \omega_{15-21}; \quad (9)$$

$$Y_{15-3} = \omega_{15-12} \omega_{15-18}; \quad (10)$$

$$Y_{15-4} = Y_{15-4}^{(1)} \vee Y_{15-4}^{(2)}, \quad (11)$$

где  $Y_{15-4}^{(1)}$  – напряжение основной обмотки якоря после возбуждения:

$$Y_{15-4}^{(1)} = \bar{W}_{15-20} Y_{5-1} Y_{16-2} \omega_{15-1} \omega_{15-8} \omega_{15-9} \wedge \omega_{15-10} \omega_{15-11} \omega_{15-13} \omega_{15-19} \omega_{15-20} \omega_{15-21}; \quad (12)$$

$Y_{15-4}^{(2)}$  – напряжение основной обмотки при начальном возбуждении:

$$Y_{15-4}^{(2)} = \bar{W}_{15-20} W_{15-17} Y_{5-1} \omega_{15-1} \omega_{15-9} \wedge \omega_{15-10} \omega_{15-13} \omega_{15-17} \omega_{15-20} \omega_{15-21}; \quad (13)$$

$$Y_{15-5} = Y_{5-1} \omega_{15-1} \omega_{15-21}. \quad (14)$$

Возбудитель не является обязательным элементом структурной модели генератора. Этот элемент присущ генераторам с электромашинным возбуждением.

Первичный двигатель [3] в общем случае содержит следующие элементы: впускную систему (ВПС) 1, газораспределительный механизм (ГРМ) 2, выпускную систему (ВЫС) 3, блок неподвижных деталей (БНД) 4, блок подвижных деталей (БПД) 5, механизм передачи к распределительным валам и агрегатам (МПА) 6; системы питания топливом (СПТ) 7, смазки (СС) 8, охлаждения (СО) 9, подогрева (СП) 10, пуска стартером (СПС) 11, пуска воздухом (СПВ) 12. Каждый из перечисленных элементов, в свою очередь, можно разделить на составляющие части.

## Логические уравнения функционирования элементов генератора

обозначение	Элемент		Уравнения внутрисистемных связей	Уравнения функционирования элементов	Физическая природа сигнала
	название				
15-1	вал генератора		$Z_{15-1-1} = X_{15-16-2}$ $Z_{15-1-2} = X_{15-21-1}$	$X_{15-1-1} = \omega_{15-1} \wedge Z_{15-1-1}$ $X_{15-1-2} = \omega_{15-1} \wedge Z_{15-1-1}$ $X_{15-1-3} = \omega_{15-1} \wedge Z_{15-1-2}$ $X_{15-1-4} = \omega_{15-1} \wedge Z_{15-1-2}$	сила сила вращающий момент вращающий момент
15-2	передний подшипниковый щит Г		$Z_{15-2-1} = X_{15-3-1}$	$X_{15-2-2} = \omega_{15-2} \wedge Z_{15-2-1}$	сила
15-3	передний подшипник Г		$Z_{15-3-1} = X_{15-1-1}$	$X_{15-3-1} = \omega_{15-3} \wedge Z_{15-3-1}$	сила
15-4	задний подшипниковый щит Г		$Z_{15-4-1} = X_{15-5-1}$	$X_{15-4-1} = \omega_{15-4} \wedge Z_{15-4-1}$	сила
15-5	задний подшипник Г		$Z_{15-5-1} = X_{15-1-2}$	$X_{15-5-1} = \omega_{15-5} \wedge Z_{15-5-1}$	сила
15-6	траверса Г		$Z_{15-6-1} = X_{15-7-1}$	$X_{15-6-1} = \omega_{15-6} \wedge Z_{15-6-1}$	сила
15-7	щеткодержатель Г		$Z_{15-7-1} = X_{15-8-2}$	$X_{15-7-1} = \omega_{15-7} \wedge Z_{15-7-1}$	сила
15-8	щетка Г		$Z_{15-8-1} = X_{15-16-1}$	$X_{15-8-1} = \omega_{15-8} \wedge Z_{15-8-1}$ $X_{15-8-2} = \omega_{15-8}$	ток сила
15-9	сталь индуктора Г		$Z_{15-9-1} = X_{15-1-3}$	$X_{15-9-1} = \omega_{15-9} \wedge Z_{15-9-1}$	вращающий момент
15-10	обмотка индуктора Г		$Z_{15-10-1} = X_{15-20-1}$ $Z_{15-10-2} = X_{15-17-1}$ $Z_{15-10-3} = X_{15-19-1}$ $Z_{15-10-4} = X_{15-9-1}$	$X_{15-10-1} = \omega_{15-10} \wedge \bar{Z}_{15-10-1} \wedge Z_{15-10-2}$ $\wedge Z_{15-10-3} \wedge Z_{15-10-4}$ $X_{15-10-2} = \omega_{15-10} \wedge \bar{Z}_{15-10-1} \wedge Z_{15-10-2}$ $\wedge Z_{15-10-3} \wedge Z_{15-10-4}$	магнитный поток магнитный поток
15-11	выпрямитель питания индуктора Г		$Z_{15-11-1} = Y_{16-2}$	$X_{15-12-1} = \omega_{15-11} \wedge Z_{15-11-1}$	ток
15-12	сталь якоря		$Z_{15-12-1} = X_{15-14-2}$ $Z_{15-12-2} = X_{15-13-2}$	$X_{15-12-1} = \omega_{15-12}$ $X_{15-12-2} = \omega_{15-12} \wedge Z_{15-12-1} \wedge Z_{15-12-2}$	температура сила
15-13	основная обмотка якоря Г		$Z_{15-13-1} = X_{15-10-2}$	$X_{15-13-1} = \omega_{15-13} \wedge Z_{15-13-2}$ $X_{15-13-2} = \omega_{15-13}$	напряжение сила
15-14	дополнительная обмотка якоря		$Z_{15-14-1} = X_{15-10-1}$	$X_{15-14-1} = \omega_{15-14} \wedge Z_{15-14-1}$ $X_{15-14-2} = \omega_{15-14}$	напряжение сила
15-15	корпус Г		$Z_{15-15-1} = X_{15-4-1}$ $Z_{15-15-2} = X_{15-2-1}$ $Z_{15-15-3} = X_{15-6-1}$ $Z_{15-15-4} = X_{15-12-2}$ $Z_{15-15-5} = Y_{16-1}$	$X_{15-15-1} = \omega_{15-15} \wedge Z_{15-15-1} \wedge Z_{15-15-2} \wedge Z_{15-15-3} \wedge Z_{15-15-4} \wedge Z_{15-15-5}$	сила
15-16	контактные кольца Г		$Z_{15-16-1} = X_{15-11-1}$	$X_{15-16-1} = \omega_{15-16} \wedge Z_{15-11-1}$ $X_{15-16-2} = \omega_{15-16}$	ток сила
15-17	устройство начального возбуждения		$Z_{15-17-1} = W_{15-17}$	$X_{15-17-1} = \omega_{15-17} \wedge Z_{15-17-1}$	ток, магнитный поток
15-18	элемент тепловой защиты		$Z_{15-18-1} = X_{15-12-1}$	$X_{15-18-1} = \omega_{15-18} \wedge Z_{15-18-1}$	электрический сигнал
15-19	элемент защиты от перенапряжения		$Z_{15-19-1} = X_{15-8-1}$	$X_{15-19-1} = \omega_{15-19} \wedge Z_{15-19-1}$	ток
15-20	устройство гашения поля		$Z_{15-20-1} = W_{15-20}$	$X_{15-20-1} = \omega_{15-20} \wedge Z_{15-20-1}$	ток
15-21	соединение вала генератора с двигателем		$Z_{15-21-1} = Y_{5-1}$	$X_{15-21-1} = \omega_{15-21} \wedge Z_{15-21-1}$	вращающий момент

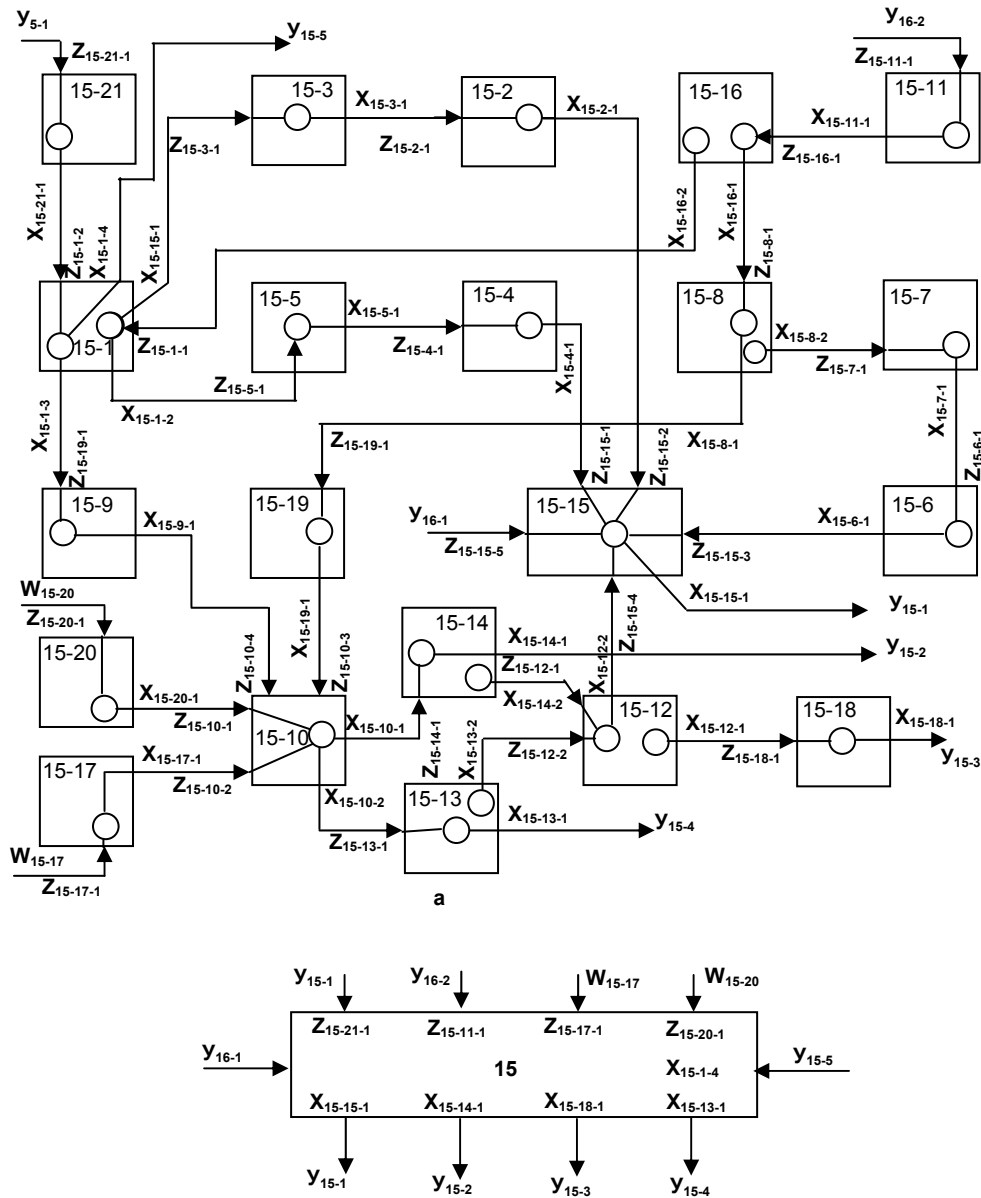


Рис. 1. Структурная модель основной электрической машины: а – развернутая схема основной электрической машины, совмещенная с графом; б – приведенная схема основной электрической машины

Логическая модель ПД представляет собой систему уравнений функционирования перечисленных элементов, выведенных на основании уравнений функционирования составляющих их элементов. Составление логических и структурных моделей элементов ПД аналогично моделям основной электрической машины.

Эти структурные модели систем и механизмов являются основой для составления обобщенной структурной модели ПД (рис. 2). Приведенная структурная модель ПД указывает на наличие внешних связей двигателя с окружающей средой, генератором СИЭЭ и САУ двигателя.

Взаимодействие двигателя с окружающей средой (ОС) происходит по входному сигналу  $U_{0-1}$ , представляющему поток воздуха, поступающего к двигателю для сжигания топлива

б

и охлаждения. Кроме того, входными параметрами описываются потоки: отработавших газов  $U_{3-1}$ ; газов  $U_{4-3}$ , прорвавшихся в картер и выброшенных через сапун; воздуха  $U_{8-3}$ , охлаждающего масляный радиатор; пара  $U_{9-5}$ , прошедшего через паровой клапан; воздуха  $U_{10-8}$ , отводящего тепло от водяного радиатора.

Связь ПД с генератором отражена выходным сигналом  $U_{5-1}$ , по которому передается вращающий момент на вал генератора, и входным сигналом  $U_{15-1}$ , по которому двигателем воспринимаются механические усилия от элементов конструкции генератора. Остальные связи ПД как объекта управления обеспечивают взаимодействие с САУ и определяют ее функции и состав.

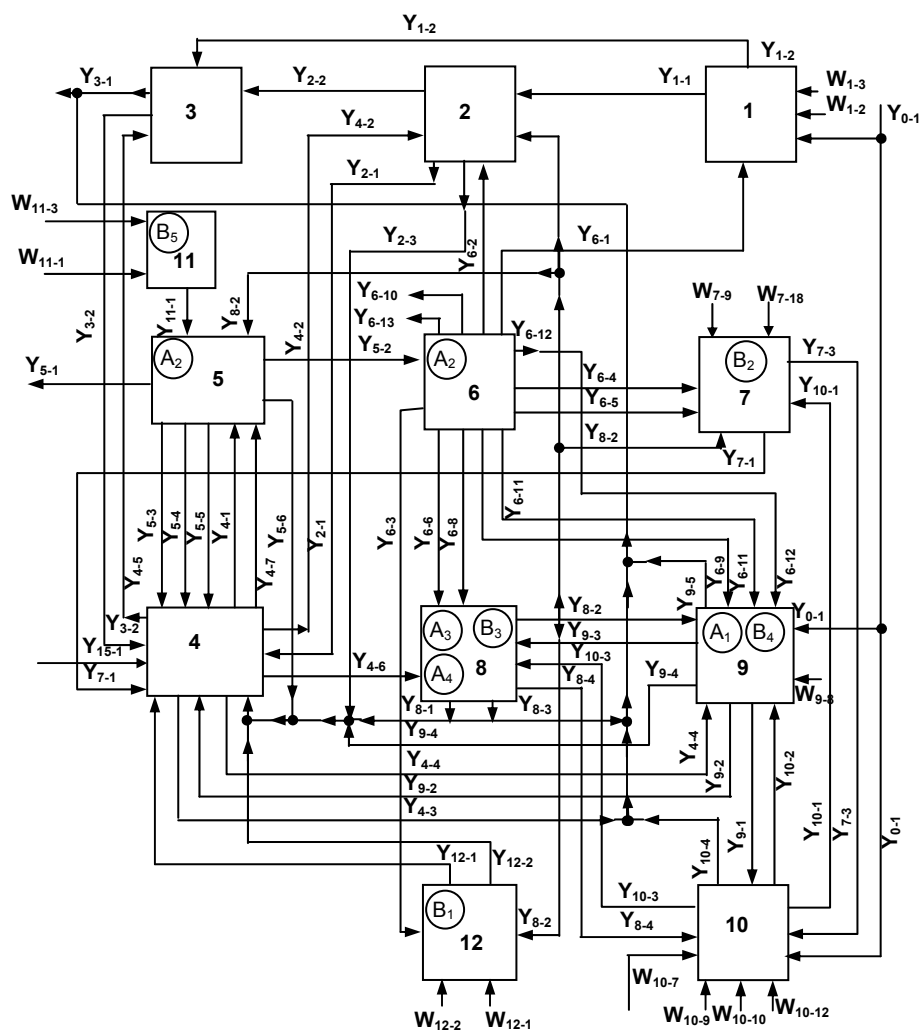


Рис. 2. Развернутая схема структурной модели первичного двигателя: 1 – впускная система; 2 – газораспределительный механизм; 3 – выпускная система; 4 – блок неподвижных деталей; 5 – блок подвижных деталей; 6 – механизм передачи к валам и агрегатам ПД; 7 – система питания топливом; 8 – система смазки; 9 – система охлаждения; 10 – система подогрева; 11 и 12 – системы пуска стартером и воздухом

Анализируя обобщенную приведенную схему ПД, можно выделить 16 управляющих функций, относящихся к различным элементам двигателя, по которым САУ должна генерировать управляющие воздействия. Исходными данными для работы САУ могут служить выходные сигналы ПД  $Y_{6-10}$  и  $Y_{6-13}$ , которые предусмотрены конструкцией существующих двигателей, и группы контролируемых параметров, которые должны измеряться средствами САУ.

САУ ПД может быть отдельной структурной единицей или интегрироваться в общую САУ СИЭЭ, учитывающую потребности в управлении элементами систем и механизмов ПД, на которые должны поступать управляющие сигналы  $W_{i,j}$ , где  $i$  – признак системы, а  $j$  – признак элемента  $i$ -й системы.

В общем случае САУ ПД должна формировать сигналы для управления:  $W_{1,2}$  – воздушной заслонкой или захлопкой;  $W_{1,3}$  – электрическим подогревательным элементом впускного тракта;  $W_{7,9}$  – подачей топлива (положением плунжеров насоса высокого давления);  $W_{7,18}$  – электроподкачивающим насосом;  $W_{8,12}$  – электрическим маслопрокачивающим

насосом;  $W_{9,8}$  – выключателем гидромфты;  $W_{10,7}$  – электродвигателем насосного агрегата подогревателя;  $W_{10,9}$  – электрическим топливным клапаном;  $W_{11,1}$  – тяговым реле или контактором стартера;  $W_{12,2}$  – воздушным пусковым краном;  $W_{11,3}$  – подзарядом аккумуляторных батарей. Набор управляющих сигналов, генерируемых САУ конкретного ПД, определяется структурой его систем и заданной степенью автоматизации. Формирование сигналов производится в соответствии с общим алгоритмом управления ИЭЭ. При этом используются входные сигналы, поступающие от групп контролируемых параметров, привод на регулятор частоты вращения  $Y_{6-13}$  и зарядный генератор  $Y_{6-10}$ , входящие в САУ ПД.

Таким образом, полученные логические уравнения функционирования в своей совокупности представляют логическую модель судового электроагрегата. Его структурная модель имеет с САУ связи, описанные выше, по которым происходит управление. С помощью логической модели построенной предложенным методом возможно решение задачи диагностики.

### Список литературы

1. **Ксенз С.П.** Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989.
2. **Сугаков В.Г.** Основы автоматизации управления и контроля передвижных источников электроэнергии общевойскового назначения: дис. ...д-ра техн. наук / Военно-инженерная академия. – Н.Новгород, 2001.
3. **Байков Б.П., Баранов С.М.** Дизели: справочник. – М.: Машиностроение, 1964.

Сугаков Валерий Геннадьевич,  
ФГОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,  
e-mail: kometalaora@male.ru

Малышев Юрий Сергеевич,  
ФГОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», аспирант,  
телефон 8-904-909-55-90,  
e-mail: kometalaora@male.ru