

В.В. Кравец, К.М. Басс, Вл.В. Кравец

## СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БЛОКА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

*Аннотация.* Проводится оценка структурной надежности электрического блока гибридного автомобиля в результате анализа возможных состояний системы, составляющих полную группу равновозможных, несовместных случайных событий.

*Ключевые слова:* надежность, структурная схема, матрица состояний, возможные состояния, безотказные состояния.

**Введение.** Гибридный автомобиль рассматривается как сложная техническая система [1, 8], состоящая из множества связанных и взаимодействующих элементов, включая водителя, которая функционирует в условиях влияния как внутренних, так и внешних случайных факторов [6]. Способ функционирования гибридного автомобиля может быть реализован различными структурами [4, 8]. Структура в основном определяет надежность проектируемого автомобиля [4, 9]. Оценить структурную надежность отдельных блоков и гибридного автомобиля в целом, а также оценить значимость отдельных блоков в обеспечении надежности гибридного автомобиля составляет актуальную задачу эскизного проектирования, решаемую математическими методами, включая теорию вероятностей, комбинаторику, булеву алгебру, матричное исчисление [2, 3, 7].

1. **Постановка задачи.** Электрический блок (ЭЛБ) гибридного транспортного средства (ГТС) состоит из электродвигателя/генератора (ЭД/Г), источника – накопителя электрической энергии №1 (аккумуляторной батареи (АКБ)), накопителя электроэнергии №2 (суперконденсатора (СК)), трех полупроводниковых устройств – ключей, управляющих потоками электрической энергии ( $K_1, K_2, K_3$ ). В соответствии с принципом функционирования ГТС по параллельной конфигурации ЭЛБ может находиться в двух основных режимах: режим движения – при котором осуществляется расход электрической энергии АКБ и СК в электродвигателе и режим рекуперации элек-

трической энергии, вырабатываемой генератором с последующим накоплением в СК и АКБ.

Структурные схемы ЭлБ в режимах движения (а) и рекуперации (б) асимметричны и представлены на Рис.1:

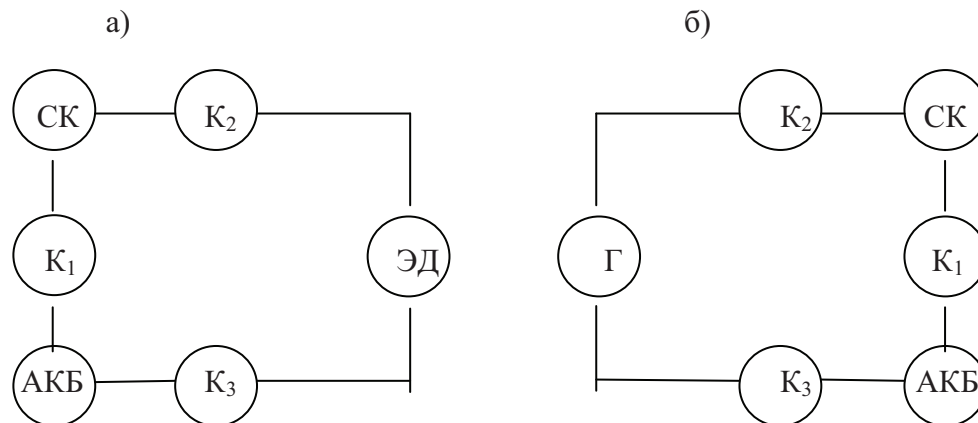


Рисунок 1

ЭлБ в режиме движения состоит из шести независимо работающих элементов:  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , СК, АКБ, ЭД, каждый из которых может находиться в двух состояниях – безотказном (работоспособном):

$$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$$

или неработоспособном (отказном):

$$\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_5, \bar{A}_6.$$

ЭлБ полагается работоспособным – событие  $A$ , если электрическая энергия АКБ и СК пройдя в соответствии со структурной схемой, преобразуется ЭД в кинетическую энергию вращательного движения мотор-колеса в условиях, когда отказавшие элементы блокируют (прерывают) поток энергии, т.е. безотказность ЭлБ характеризует его способность обеспечивать подвижность ГТС. Требуется найти вероятность случайного события  $A$  – безотказная работа электрического блока, в зависимости от случайных состояний составляющих его элементы, т.е. надежность ЭлБ определяется по классической формуле:

$$R = P(A).$$

2. Матрица состояний. Безотказное состояние каждого элемента и ЭлБ в целом обозначим «1», а отказное – «0». Тогда количество возможных состояний ЭлБ –  $U(u_1, u_2, \dots, u_N)$ , находятся по формуле:

$$N = 2^6, \text{ т.е. } N = 64,$$

а возможные состояния ЭлБ находятся с помощью диаграммы состояний, представляющей прямоугольной – (6×64) -матрицей состояний [5]:

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$u_{15}$	$u_{16}$
$A_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$A_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$A_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_4$	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$A_5$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
$A_6$	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	$u_{17}$	$u_{18}$	$u_{19}$	$u_{20}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$u_{25}$	$u_{26}$	$u_{27}$	$u_{28}$	$u_{29}$	$u_{30}$	$u_{31}$	$u_{32}$
$A_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$A_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_4$	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$A_5$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
$A_6$	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	$u_{33}$	$u_{34}$	$u_{35}$	$u_{36}$	$u_{37}$	$u_{38}$	$u_{39}$	$u_{40}$	$u_{41}$	$u_{42}$	$u_{43}$	$u_{44}$	$u_{45}$	$u_{46}$	$u_{47}$	$u_{48}$
$A_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$A_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_4$	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$A_5$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
$A_6$	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	$u_{49}$	$u_{50}$	$u_{51}$	$u_{52}$	$u_{53}$	$u_{54}$	$u_{55}$	$u_{56}$	$u_{57}$	$u_{58}$	$u_{59}$	$u_{60}$	$u_{61}$	$u_{62}$	$u_{63}$	$u_{64}$
$A_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_4$	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$A_5$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
$A_6$	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

3. Структурная надежность в режиме движения. С помощью структурной схемы (Рис. 1 а) и построенной матрицы состояний из

полной группы случайных событий  $U(u_1, u_2, \dots, u_{62})$  находятся работоспособные состояния ЭлБ ( $A$ ):

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$u_{15}$	$u_{16}$
$A$	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	$u_{17}$	$u_{18}$	$u_{19}$	$u_{20}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$u_{25}$	$u_{26}$	$u_{27}$	$u_{28}$	$u_{29}$	$u_{30}$	$u_{31}$	$u_{32}$
$A$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	$u_{33}$	$u_{34}$	$u_{35}$	$u_{36}$	$u_{37}$	$u_{38}$	$u_{39}$	$u_{40}$	$u_{41}$	$u_{42}$	$u_{43}$	$u_{44}$	$u_{45}$	$u_{46}$	$u_{47}$	$u_{48}$
$A$	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	$u_{49}$	$u_{50}$	$u_{51}$	$u_{52}$	$u_{53}$	$u_{54}$	$u_{55}$	$u_{56}$	$u_{57}$	$u_{58}$	$u_{59}$	$u_{60}$	$u_{61}$	$u_{62}$	$u_{63}$	$u_{64}$
$A$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Т.е., случайное событие ( $A$ ) является суммой соответствующих несовместных случайных событий

$$u_j (j=1, 3, 5, 9, 11, 17, 21, 33, 35, 37, 41, 43, 49, 53), \text{ т.е.}$$

$$A = u_1 + u_3 + u_5 + u_9 + u_{11} + u_{17} + u_{21} + u_{33} + u_{35} + u_{37} + u_{41} + u_{43} + u_{49} + u_{53}.$$

Количество работоспособных (безотказных) состояний ЭлБ рассматриваемой структуры в режиме движения ГТС оказалось равным четырнадцати из шестидесяти четырех равновозможных, несовместных, составляющих полную группу случайных состояний. Соответствующая структурная надежность ЭлБ определяется по классической формуле расчета вероятности:

$$R_{str}^a = \frac{14}{64}, \text{ т.е. } R_{str}^a = 0,21875.$$

4. Структурная надежность в режиме рекуперации. Аналогичным методом находится структурная надежность ЭлБ в режиме рекуперации. В режиме рекуперации ЭлБ также состоит из шести независимо работающих элементов:  $K_1, K_2, K_3, СК, АКБ, Г$ , каждый из которых может находиться в двух состояниях:

1–безотказное (работоспособное)  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$

0–неработоспособное (отказное)  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_5, \bar{A}_6$ .

ЭлБ полагается работоспособным в режиме рекуперации – событие  $A$ , если кинетическая энергия вращательного движения преоб-

разуется генератором в электрическую энергию, накапливаемую в СК и АКБ согласно структурной схемы (Рис. 1 б) в условиях, когда отказавшие элементы блокируют (прерывают) поток энергии. Возможные состояния ЭлБ в режиме рекуперации также представляет составленная ранее матрица состояний  $-(6 \times 64)$ . С помощью структурной схемы (Рис. 1 б) и матрицы состояний находятся работоспособные состояния ЭлБ в режиме рекуперации:

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$u_{15}$	$u_{16}$
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	$u_{17}$	$u_{18}$	$u_{19}$	$u_{20}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$u_{25}$	$u_{26}$	$u_{27}$	$u_{28}$	$u_{29}$	$u_{30}$	$u_{31}$	$u_{32}$
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	$u_{33}$	$u_{34}$	$u_{35}$	$u_{36}$	$u_{37}$	$u_{38}$	$u_{39}$	$u_{40}$	$u_{41}$	$u_{42}$	$u_{43}$	$u_{44}$	$u_{45}$	$u_{46}$	$u_{47}$	$u_{48}$
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	$u_{49}$	$u_{50}$	$u_{51}$	$u_{52}$	$u_{53}$	$u_{54}$	$u_{55}$	$u_{56}$	$u_{57}$	$u_{58}$	$u_{59}$	$u_{60}$	$u_{61}$	$u_{62}$	$u_{63}$	$u_{64}$
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Сравнивая полученные результаты с предыдущими, устанавливаем, что матрицы работоспособных состояний ЭлБ в режимах рекуперации и движения ГТС полностью совпадают. Следовательно, структурная надежность ЭлБ в режимах рекуперации и движения количественно равны, т.е.

$$R_{str}^{\sigma} = R_{str}^a = 0,21875.$$

Выводы. На основе составленной матрицы состояний проведена оценка структурной надежности ЭлБ гибридного автомобиля в режимах рекуперации и движения. Показано, что, в силу асимметричности структурных схем в режимах рекуперации движения соответствующая структурная надежность ЭлБ оказалась количественно равной.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем.- М.: «Советское радио», 1973. - 440с.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Наука.- 1988. – 480с.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука. – 1965. – 524с.
4. Канарчук В.Е., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. – К.: Либідь, 2003. – 424с.
5. Кравец В.В., Басс К.М., Кравец Вл.В. Надежность автомобиля как сложной технической системы (статика отказов): учебное пособие – Д.: ГВУЗ «НГУ», 2012.- 65с.
6. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы водитель-автомобиль-дорога-среда. М.: Машиностроение. – 1986. – 214с.
7. Салуквадзе Г.П. Теоретические основы надежности. М.: - Высш. школа, 1986. – 208с.
8. Хубка В. Теория технических систем: пер. с нем. – М.: Мир, 1987.- 208с.
9. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304с.