

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассчитано время безотказной работы современного электронного регулятора напряжения низковольтных цепей. Выполнен сравнительный анализ с типовыми регуляторами.

*Ключевые слова:* надежность, узел управления, регулирование напряжения

### Введение

Обеспечение бесперебойной работы электрифицированных железных дорог требует применения надежной системы питания электроэнергией цепей управления электроподвижным составом. Высокая надежность систем управления электроподвижным составом – одно из условий безопасности движения поездов на железных дорогах Украины.

Согласно ГОСТ 2.601-95 “Эксплуатационные документы” к эксплуатационным показателям систем относятся понятия, связанные с параметрами и характеристиками, техническими обслуживаниями и ремонтами, транспортировкой, хранением, утилизацией, гарантийными обязательствами и другие данные об изделии, интересующие заказчика и производителя [1]. К эксплуатационным показателям систем автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей электроподвижного состава относятся надежность в эксплуатации, постоянство и точность среднего значения напряжения с допустимыми параметрами автоколебаний, расходы на содержание, собственное энергопотребление [2].

Основную массу электроподвижного состава (ЭПС) постоянного тока железных дорог Украины составляют: электровозы ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11м, ЧС2 и ЧС7, а также электропоезда ЭР1 и ЭР2. На указанных электровозах и электропоездах питание цепей управления, освещения, сигнализации, устройств локомотивной сигнализации осуществляется от генератора постоянного тока.

Анализ данных, приведенных в технической литературе [3] показывает, что из элементов, входящих в структуру системы питания цепей управления, наименее надежными являются узлы управления. Следует отметить, что речь идет не только о полном отказе узла управления, но и о сверхнормативном отклонении его рабочих параметров в процессе эксплуатации подвижного состава, которое приводит к выхо-

ду из строя других узлов цепей управления и ухудшению эксплуатационных показателей элементов системы управления.

### Постановка задачи

Надежность является комплексным свойством, которое включает в общем случае безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость [4]. Все указанные факторы в конечном итоге влияют на эксплуатационные расходы, связанные с системами автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей ЭПС и требует более детального рассмотрения. С помощью показателей надежности выполняется оценка случайных величин – времени безотказной работы, времени восстановления, времени сохранения параметров при хранении, наработка аппаратуры или ее элементов до отказа.

### Материалы исследований

Аналізу надежности бесконтактных систем управления и бесконтактных регуляторов напряжения на полупроводниковых элементах ЭПС посвящены исследования ВЭЛНИИ и ВНИИЖТа [5, 6]. Эти работы посвящены поиску путей совершенствования бесконтактных регуляторов напряжения электровозов переменного тока ВЛ80К. В них показано, что для данного класса систем распределение отказов описывается экспоненциальным законом распределения, а в качестве основных характеристик надежности, рекомендовано принять взаимосвязанные показатели – вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы и интенсивность отказов.

В общей практике для определения вероятности безотказной работы релейной и электронной аппаратуры в течение некоторого интервала  $t$  также используется экспоненциальный закон распределения безотказной работы [4]

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

При определении параметров по (1) обычно предполагают, что аппаратура прошла период приработки, поток отказов является простейшим, старение элементов отсутствует. Расчетный период для аппаратуры систем управления ЭПС чаще всего принимают равным семи годам (22995 часов) работы. Этот период приблизительно соответствует времени пробега ЭПС между очередными заводскими ремонтами [3].

Наименьшая статистическая вероятность отказов узлов управления типа СРН-8 составляет  $\lambda_{PH} = 0,00105 \text{ ч}^{-1}$ . Следовательно, распределение вероятности безотказной работы

$$P(t) = e^{-0,00105t}. \quad (2)$$

Средняя наработка на отказ [4]

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{PH}}. \quad (3)$$

Для  $\lambda_{PH} = 0,00105 \text{ ч}^{-1}$  имеем  $T_{cp} \approx 952 \text{ ч}$ .

Вероятность безотказной работы узлов управления низковольтным напряжением за расчетный период (22995 ч.) согласно (2)

$$P(t) = 3,266 \cdot 10^{-11}.$$

Показатели долговечности, в отличие от показателей безотказности, обычно не рассчитываются, а назначаются с учетом опыта эксплуатации аналогичных типов аппаратуры и экономических факторов [4].

Среднее время восстановления одного экземпляра узла управления низковольтным напряжением (без учета операций снятия, обдувки и др.) на основе данных, которые представлены в [7], в дальнейшем примем  $T_B = 1,087 \text{ ч}$ .

Интенсивность восстановления релейной аппаратуры, к которой относятся и узлы управления, определяется как [4]

$$\mu_B = \frac{1}{T_B}. \quad (4)$$

При  $T_B = 1,087 \text{ ч}$  получаем  $\mu_B = 0,92 \text{ ч}^{-1}$ .

Вероятность восстановления аппаратуры при простейшем потоке моментов завершения операций по восстановлению определяется как:

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu_B t}, \quad (5)$$

где  $t$  – часовой интервал, который отводится на восстановление аппарата. Принимаем  $t = 1 \text{ час}$  [4]. Тогда вероятность восстановления составит  $P_B(t) = 0,60$ .

Стоимость работ по ремонту и техническому

обслуживанию панели управления электропоезда ЭР1 или ЭР2 на один миллион километров пробега составляет 21,3 % от общих расходов на работы по обслуживанию и ремонту всей низковольтной электрической аппаратуры цепей управления электропоезда и 22,3 % временных затрат. Причем, на техническое обслуживание в объеме ТОЗ приходится 18,9 % денежных и 17,9 % временных затрат. Таким образом, поддержание надежности элементов панели управления, основным элементом которой является регулятор напряжения, на требуемом техническом уровне, сопряжено с существенными расходами.

Известно, что техническое обслуживание панелей управления предусматривает выполнение ручных операций: зачистка контактов, настройки, проверка крепления и др., которые сложно механизировать и автоматизировать. Поэтому единственный путь снижения затрат на содержание панелей управления состоит в разработке устройств, которые:

- по своей конструкции исключают в эксплуатации работы по зачистке и измерению износа контактов, регулирование и другие операции по приведению узла в работоспособное состояние;

- позволяют сократить количество ремонтов и технических обслуживаний.

Иначе говоря, решение задачи требует разработки узлов управления источниками питания с более высокими по сравнению с существующими показателями надежности, которые не требуют текущих ремонтов, осмотров и которые позволяют повысить уровень унификации таких узлов для разных моделей ЭПС. Указанными свойствами могут обладать устройства на базе микроконтроллеров и высоконадежных полупроводниковых ключей. Один из возможных вариантов такой схемы представлен на рис. 1.

Для определения показателей надежности на практике используется метод среднегрупповой интенсивности отказов [4, 5, 6]. Он основан на положении об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы элементов схемы. Такой подход позволяет оценить надежность по интенсивности отказов элементов, которая является средней для множества элементов данного типа. Данные отказов, полученные экспериментально для конкретных элементов приводятся в специальной литературе [4, 8]. С точки зрения надежности, в рассматриваемой схеме отсутствуют резервные группы, то есть, имеет место группа последовательно соединенных независимых элементов с самым простым потоком отказов, что отображено на рис. 2.

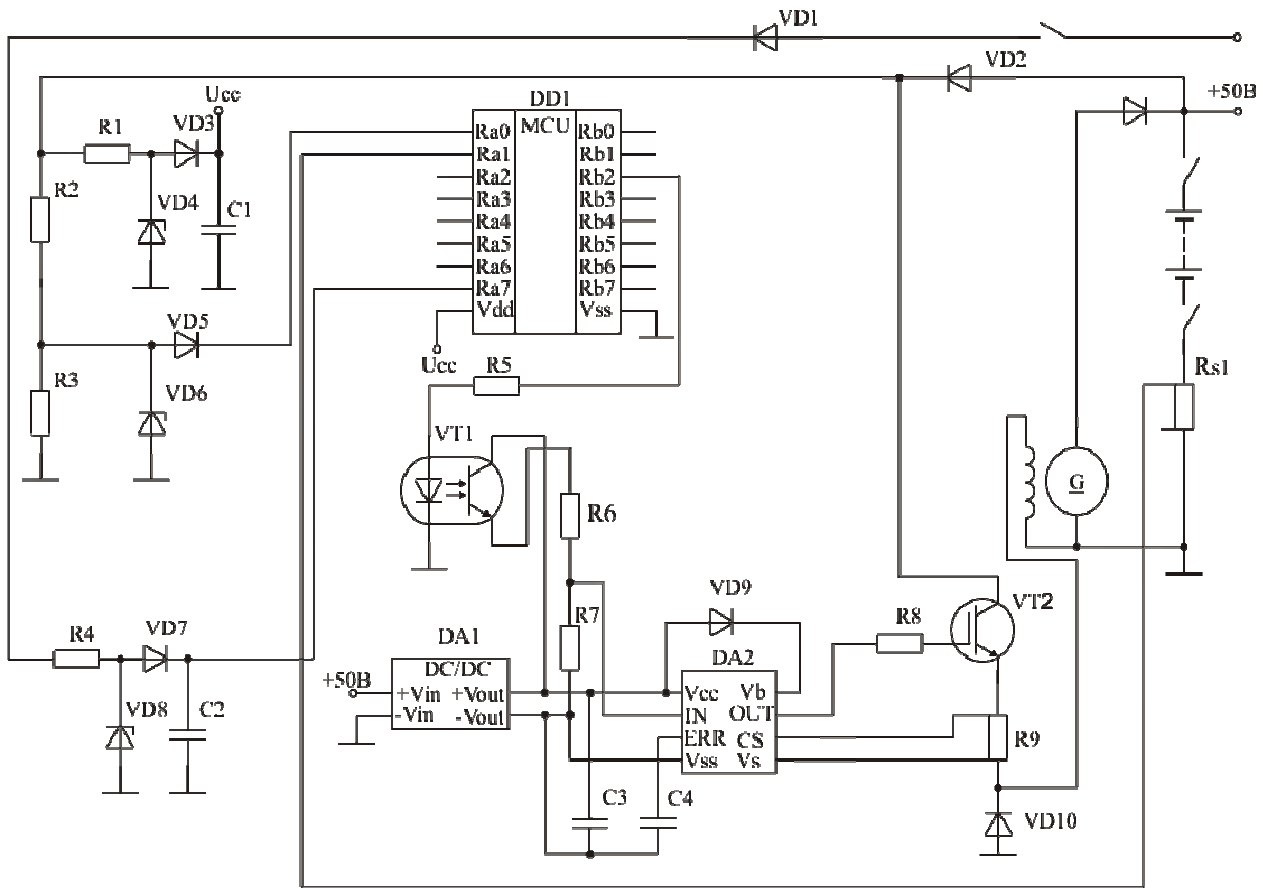


Рис. 1. Принципиальная схема узла управления напряжением на современной элементной базе

Интенсивность отказов устройств или системы, состоящей из  $m$  элементов, определяется [4]

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot k_i, \quad (6)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -того элемента;  
 $k_i$  – коэффициент, учитывающий условия

работы  $i$ -того элемента системы (коэффициент нагрузки).

Наработка на отказ устройства (системы), которая состоит из  $m$  элементов, определяется как [3, 4]

$$T_{\text{отк}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}, \text{ ч.} \quad (7)$$

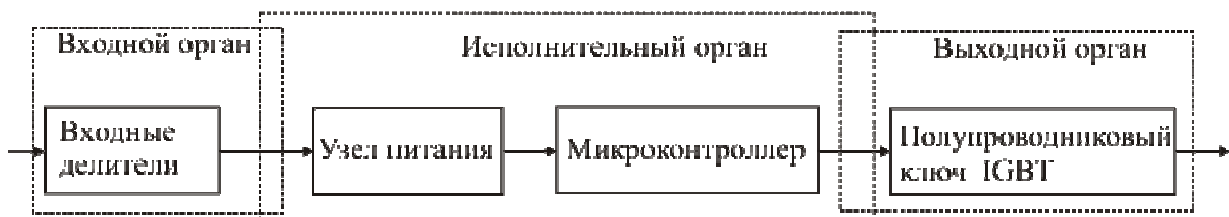


Рис. 2. Логическая схема узла управления на основе микроконтроллера и IGBT

В табл. 1 представлен расчет показателей надежности разработанной автором схемы узла управления.

В представленном расчете, коэффициенты нагрузки схемы определены с учетом их режимов работы и рассчитаны по следующим выражениям [4].

Коэффициент нагрузки резисторов

$$k_{\text{рез}} = \frac{P_{\text{рас}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{рас}}$ ,  $P_{\text{ном}}$  – рассеиваемая и номинальная мощность резистора, Вт.

Коэффициент электрической нагрузки конденсаторов

$$k_{\text{конд}} = \frac{U_{\text{раб}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

где  $U_{раб}$ ,  $U_{ном}$  – соответственно рабочее и номинальное напряжение, В.

Коэффициент электрической нагрузки полупроводниковых приборов рассчитываем следующим образом.

Таблица 1

**Расчет интенсивности отказов узла управления на основе микроконтроллера и IGBT**

Позиционное обозначение	Количество $n$	$k_i \cdot 10^{-3}$	$\lambda_i, 10^{-6} \cdot ч^{-1}$	$k_i \cdot \lambda_i \cdot n, 10^{-9} \cdot ч^{-1}$
VD1	1	5	0,2	1
VD2	1	300	0,2	60
VD3	1	0,08	0,2	16
VD4	1	91	0,2	18
VD5	1	0,08	0,2	16
VD6	1	91	0,2	18
VD7	1	0,08	0,2	16
VD8	1	91	0,2	18
VD9	1	300	0,2	60
VD10	1	300	0,2	60
VT1	1	10	0,5	5
VT2	1	100	0,16	16
DD1	1	300	0,1	30
DA1	1	100	0,1	10
DA2	1	100	0,16	16
C1,C2, C3,C4	4	125	0,06	30
R1	1	300	0,04	12
R2	1	50	0,04	10
R3	1	50	0,04	10
R4	1	50	0,04	10
R5	1	50	0,04	10
R6	1	50	0,04	10
R7	1	50	0,04	10
R8	1	300	0,04	12
R9	1	300	0,04	12
Паек	73	500	0,1	3650
Интенсивность отказов без пайек				486
Интенсивность отказов с пайками				4136

Для диодов

$$k_{диод} = \frac{I_{раб}}{I_{ном}} \cdot \frac{U_{обр.раб}}{U_{обр.ном}}, \quad (10)$$

где  $I_{ном}$ ,  $I_{раб}$  – номинальный и рабочий ток полупроводникового диода, А;

$U_{обр.ном}$ ,  $U_{обр.раб}$  – номинальное и рабочее

обратное напряжение на  $p-n$  переходе полупроводникового диода, В.

Для транзисторов

$$k_{транз} = \frac{I_{к.раб}}{I_{к.ном}} \cdot \frac{U_{кэ.раб}}{U_{кэ.ном}}, \quad (11)$$

где  $I_{к.ном}$ ,  $I_{к.раб}$  – номинальный и рабочий токи коллектора транзистора, А;

$U_{кэ.ном}$ ,  $U_{кэ.раб}$  – номинальное и рабочее напряжение на переходе коллектор-эмиттер полупроводникового транзистора, В.

Коэффициент электрической нагрузки микроконтроллера принят в пределах 0,3...0,5, что совпадает с рекомендациями для общепромышленных электрических устройств [4].

В табл. 2 представлены результаты расчета показателей безотказной работы предлагаемого узла управления.

Таблица 2

**Сравнение показателей безотказности узлов управления**

Тип узла	Интенсивность отказов $\lambda_i, ч^{-1}$	$T_{отк}, ч$	Вероятность безотказной работы $P(t)$ через 7 лет эксплуатации (22995 ч)
СРН-8	$1,05 \cdot 10^{-3}$	952,4	$3,26 \cdot 10^{-11}$
По рис. 2	$4,136 \cdot 10^{-6}$	241779	0,909

Наиболее наглядным является сравнение графических зависимостей распределения вероятности безотказной работы узлов управления, которые представлены на рис. 3.

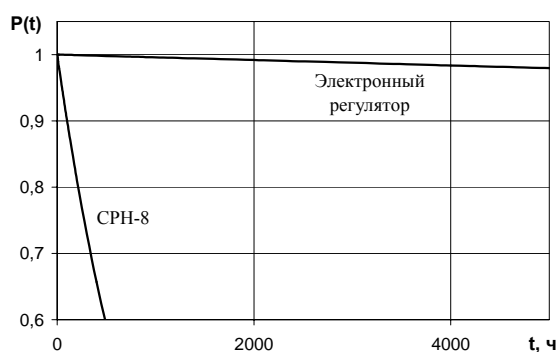


Рис. 3. График распределения вероятности безотказной работы узлов управления напряжения

Анализ полученных графиков показывает, что вероятность безотказной работы узла управления на современной элементной базе составляет 0,91 через семь лет эксплуатации. Для традиционного узла управления, который находится в эксплуа-

тации, время безотказной работы сравнительно низкое, что целиком подтверждается практикой – ремонт и обслуживание производится на каждом ТОЗ [3].

Вероятность безотказной работы узла управления на основе угольного регулятора типа СРН-8 через семь лет эксплуатации не сопоставима с аналогичным показателем предлагаемого блока, поскольку фактически установленный при заводском ремонте новый блок СРН-8 за этот период времени многократно заменяется. Поэтому для сравнения определим вероятность безотказной работы узлов управления через расчетное время наработки на отказ для СРН-8, т.е. через 952 часа эксплуатации.

Для СРН-8 получим  $P(t) = 0,368$ . Для схемы на основе микроконтроллера получим соответственно  $P(t) = 0,996$ , что в 2,7 раза больше, чем для СРН-8.

Проведенные исследования показывают, что узлы управления систем автоматического регулирования цепей управления на современной элементной базе позволяют существенно повысить надежность действующих систем питания и увеличить межремонтные пробеги. Так для электропоездов ЭР1 и ЭР2 обслуживание панелей управления низковольтных цепей выполняется во время ТОЗ через пять суток работы или 45 часов рабочего времени электропоезда. При этом вероятность безотказной работы на этот момент времени согласно (2) достигнет значения 0,954.

Для узла управления на микроконтроллере вероятность безотказной работы величиной 0,954 будет соответствовать

$$t = -\frac{\ln P(t)}{\lambda(t)}, \quad (12)$$

$$t = -\frac{\ln 0,954}{4,136 \cdot 10^{-6}} = 11424 \text{ ч.}$$

Эта величина составляет половину срока эксплуатации электропоезда между капитальными ремонтами КР1 (7 лет или 22995 часов эксплуатации).

### Вывод

Приведенный расчет показал возможность исключения узлов управления систем автома-

тического регулирования напряжения из программы деповских ремонтов за счет значительного повышения надежности. Достаточным является проведение лишь технического обслуживания во время текущего ремонта объемом ТР2, т.е. не более трех раз в промежутке между капитальными ремонтами в объеме КР1. Причем, само техническое обслуживание предусматривает проверку креплений выводов, исправности корпусов, очистки поверхностей печатных плат от пыли путем продувки сжатым воздухом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эксплуатационные документы. Единая система конструкторской документации [Текст]: ГОСТ 2.601-95. – М.: Госстандарт России, 1995. – 30 с.
2. ДСТУ 2773-94 Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови [Текст]; Введ. 01.07.96. – К.: Держстандарт України, 1996. – 74 с.
3. Белухин, Д. С. Повышение эксплуатационных показателей систем автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей электроподвижного состава [Текст]: дис... на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.09 / Д. С. Белухин. – Д., 2010. – 202 с.
4. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники [Текст]: в 2 т. / ред. Б. Х. Кривицкий, В. Н. Дулин. – М.: Энергия, 1977. – Т. 1. – 504 с.
5. Плахов, Н. М. Исследование надежности бесконтактных регуляторов напряжения [Текст] / Н. М. Плахов, А. П. Штанько // Сб. тр. ВЭЛНИИ «Электровозостроение». – 1970. – № 12 – С. 161-165.
6. Литвин, А. Г. Расчет надежности бесконтактных систем управления применяемых на подвижном составе [Текст] / А. Г. Литвин // Сб. науч. тр. ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1970. – Вып. 422. – С.117-123.
7. Сборник типовых технически обоснованных норм времени на слесарные работы при техническом обслуживании и текущем ремонте электропоездов ЭР1, ЭР2: Технологическо-нормировочные карты [Текст]. – М.: Транспорт, 1978. – 448 с.
8. Сборник задач по теории надежности [Текст] / ред. А. М. Половко, И. М. Маликов. – М.: Советское радио, 1972. – 408 с.

Поступила в редколлегию 05.11.2011.

Принята к печати 23.11.2011.

Д. С. БЛУХІН

## **ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Розраховано час безвідмовної роботи сучасного електронного регулятора напруги низьковольтних кіл. Виконано порівняння з типовими регуляторами.

*Ключові слова:* надійність, вузол управління, регулювання напруги

D. S. BELUKHIN

## **IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF SYSTEMS FOR AUTOMATIC REGULATING THE VOLTAGE OF ELECTRIC ROLLING STOCK**

The faultless operation time of modern electronic voltage regulator for low-voltage chains is determined. A comparative analysis with model regulators is executed.

*Keywords:* reliability, control unit, voltage regulation