УДК 621.316

А.Ф. Белоусов[1], Д.А. Белоусов[2]

[1] *Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова*
[2] *ООО «Евросвязь»*

ИСТОЧНИК СВЕТА НА СВЕРХЪЯРКИХ СВЕТОДИОДАХ

Приведены результаты исследования: одного светодиода, двух матиц, одратноходового преобразователя напряжения предназначенного для питания светодиодных матриц. На основе анализа электромагнитных процессов, происходящих в силовом ключе определены параметры накопительной индуктивности, транзисторного силового ключа, ШИМ регулятора.

Ключевые слова: *обратноходовой преобразователь, накопительная индуктивность, ШИМ регулятор, вероятность безотказной работы, резервирование, переключающее устройство, интенсивность отказов.*

Введение

Одним из показателей качества жизни в городах, поселках и других населенных пунктах является наличие освещения транспортных магистралей, улиц, дворов, пешеходных переходов. Количественные параметры уровней освещенности регламентируется нормативными документами [1-6].

Освещение производится в вечернее, ночное и предрассветное время суток, а его продолжительность зависит от времени года и географических координат населенного пункта. Необходимое значение освещенности достигается путем установки светильников на опорах, которые располагаются с одной или двух сторон магистралей или улиц.

Светодиодные светильники подключаются к воздушным или кабельным сетям напряжением 220 В частотой 50 Гц. В состав светильника входят: стабилизированный источник напряжения светодиодные матрицы, световой отражатель и устройство контроля рабочего состояния.

В процессе эксплуатации светильники испытывают действие окружающей среды: длительные и кратковременные отклонения от нормы питающего напряжения, температуры, которая может изменяться в пределах от –30 °С до + 60 °С, при изменении относительной влажности от 45 % до 95 %, запыленности, солнечной радиации, ударов молний, при которых напряжение в сетях кратковременно повышается до 1000 В.

Со временем проявляются процессы связанные с естественным старением изоляции и полупроводниковых структур. Все перечисленные факторы существенно влияют на эксплуатационные характеристики светильников.

Изложение основного материала

Исходя из требований преобразования электрической энергии в световую с наибольшим коэффициентом полезного действия, в настоящее время сверхъяркие светодиоды (High Power LEDs) являются наиболее перспективными. Световой поток светодиода пропорционален проходящему току через $n-p$ переход, но его величина ограничивается предельно допустимой мощностью рассеяния на ограниченной площади кристалла. Поэтому для увеличения светового потока ведущие производители сверхъярких светодиодов объединят на одной пластинке InGaN несколько единиц, десятков, сотен и соединяют из группами.

В группе диоды соединяются последовательно, а затем группы между собой соединяются параллельно. Количество светодиодов на полупроводниковой пластине определяется предельно допустимой критической температурой, при превышении которой наступает ее разрушение.

Для успешной эксплуатации светильников необходимо знать электрические и светотехнические характеристики сверхъярких светодиодов и матриц. Для определения этих характеристик были взяты: сверхъяркий светодиод с мощностью рассеяния 3 Вт, две светодиодные матрицы 3 × 3 на 10 Вт и 3 × 10 на 32 Вт.

В лаборатории кафедры светотехники и источников света Харьковского национального университета городского хозяйства имени А.Н. Бекетова при помощи электроизмерительной аппаратуры и светоизмерительного шара были проведены их испытания. Результаты электрических испытаний представлены на графиках вольт-амперных характеристик, которые показаны на рис. 1.

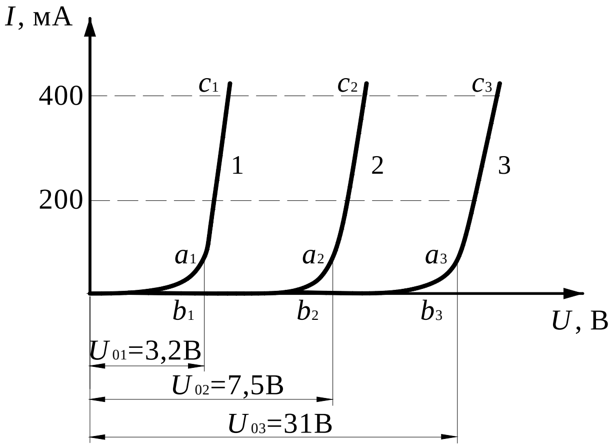

Рис. 1. Вольт-амперные характеристики сверхъяркого светодиода и матриц:
Кривая 1 – вольт-амперная характеристика одного светодиода; кривая 2 – вольт-амперная характеристика матрицы 3 × 3; кривая 3 – вольт-амперная характеристика матрицы 3 × 10

Характеристики показывают, что сверхъяркий светодиод и матрицы представляют собою нелинейные элементы. Вольт-амперные характеристики, которые представляют собой ломаные линии с одним изломом.

Сопротивление цепи состоит из дополнительного сопротивления R_q и прямого сопротивления диодов R_i. Обратное сопротивление диодов равно бесконечности. При $U < E$ ток в цепи $I = 0$, а при $U > E$ в цепи появляется ток, равный

$$I = \frac{U - E}{R}, \qquad (1)$$

где $R = R_q + R_i$.

Наклон прямолинейного участка характеризуется

$$\frac{dI}{dU} = G = \frac{1}{R}.$$

При соединении светодиодов последовательно, точка излома смещается вправо, а величина напряжения смещения E зависит от количества светодиодов включенных последовательно.

На рис. 2 показана схема замещения.

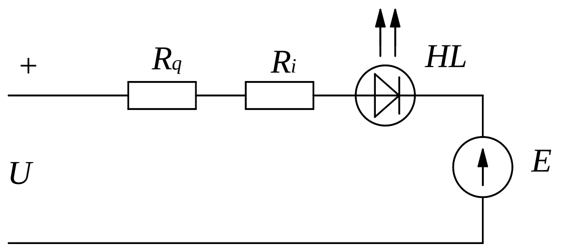

Рис. 2. Схема замещения сверхъяркого светодиода

При $U < E$ ток в цепи отсутствует, а при $U > E$ диод HL открывается и ток определяется соотношением (1).

На основе закона сохранения энергии составлен ее баланс:

$$W_И = W_T + W_C,$$

где $W_И$ – электрическая энергия потребляемая от источника;

W_T – энергия тепловых потерь;

W_C – световая энергия, генерируемая светодиодами.

Для современных LEDs $W_C = 0{,}4 W_И$.

На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости светового потока Φ от проходящего тока $\Phi = f(I)$: через один светодиод – кривая *а*, через светодиодную матрицу 3 × 3 – кривая *б* и через матрицу 3 × 10 – кривая *в*.

В нормативных документах [2-7] и статье [6] сформулированы основные светотехнические параметры, такие как: величина светового потока, кривая силы света, корреляционная цветовая температура, пульсация питающего светодиод напряжения, вызывающих фликер, уровень гармоник поступающих в осветительную сеть, наработка на отказ и др.

С учетом этих требований был разработан и испытан стабилизированный высокочастотный источник, функциональная схема которого показана на рис. 4.

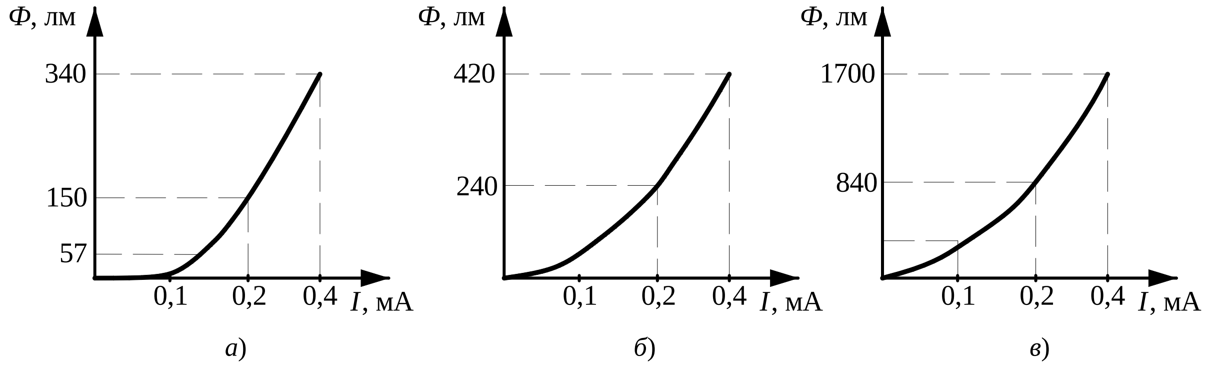

Рис. 3. Зависимость светового потока от проходящего тока через *p – n* переходы

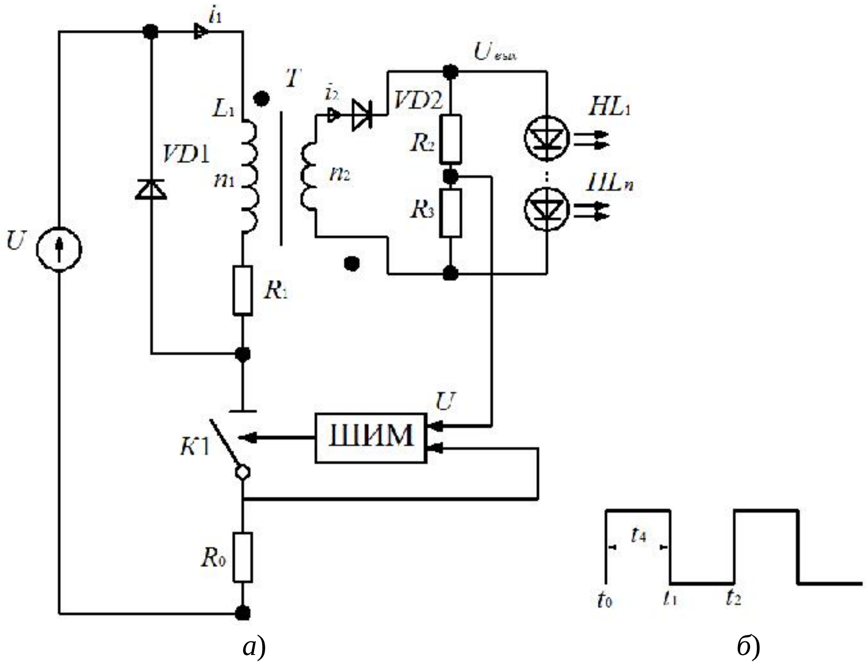

Рис. 4. Функциональная схема высокочастотного стабилизированного источника

Силовая часть источника представляет собой обратноходовой преобразователь постоянного напряжения. Он состоит из: силового ключа *K*1, который может быть выполнен на биполярном или полевом высоковольтных транзисторах; импульсного трансформатора *T* с первичной и вторичной обмотками с числом витков n_1 и n_2; силовых диодов $VD1$ и $VD2$, датчика напряжения R_2, R_3; датчика тока R_0; ШИМ регулятора, управляющего работой силового ключа.

Рассмотрим работу преобразователя и на основе проходящих электромагнитных процессов определим величины токов и напряжений. На рис. 4,*б* показана временная диаграмма работы ключа. На интервале времени $t_0 \le t \le t_1$ управляющий импульс ШИМ открывает силовой ключ, по первичной обмотке трансформатора, ключу *K* и резистору R_1 проходит ток i_1, при этом диоды $VD1$ и $VD2$ закрыты.

Ток в цепи нарастает по экспоненциальному закону

$$i_1 = \frac{U}{R_1 + R_0}\left(1 - e^{\frac{R_1+R_0}{L_1}t}\right), \qquad (2)$$

где R_1 и L_1 – активное сопротивление и величина индуктивности первичной обмотки.

Величина обратного напряжения, приложенного к диоду $VD1$, равна

$$U_{VD1} = L_1 \frac{d\,i_1}{d\,t} = U\,e^{-\frac{R_1+R_0}{L_1}t}. \qquad (3)$$

При протекании тока i_1 индуктивность L_1 накапливает энергию равную $W_M = \frac{L_1 \cdot i_1^2}{2}$, ее максимальное значение будет при $t = t_4$

$$W_{M_{\max}} = \frac{L_1 U^2 \left(1 - e^{\frac{-R_1+R_0}{L_1} t_4}\right)^2}{2\left(R_1+R_0\right)^2}. \qquad (4)$$

После окончания импульса t_4 ключ закрывается, а диоды $VD1$ и $VD2$ открываются. Энергия индуктивности L_1 через вторичную обмотку трансформатора передается в нагрузку.

На этом интервале $t_1 \le t \le t_2$ справедливо равенство

$$i_1\left(R_1+R_0\right) + L_1 \frac{d\,i_1}{d\,t} = 0.$$

Принужденная составляющая процесса равна нулю, а свободная

$$i_{1св} = Ae^{-\frac{R_1+R_0}{L_1}t},$$

где A – постоянная интегрирования, для ее нахождения пользуемся первым законом коммутации

$$i_1 /_{t=t_4} = \frac{U}{R_1+R_0}\left(1 - e^{-\frac{R_1+R_0}{L_1}t_4}\right)^2.$$

Отсюда $A = \frac{U}{R_1+R_0}\left(e^{-\frac{R_1+R_0}{L_1}t_4} - 1\right)^2$.

Поэтому на этом интервале ток i_1 равен

$$i_1 /_{t>t_4} = \frac{U}{R_1+R_0}\left(e^{\frac{-R_1+R_0}{L_1}t_4} - 1\right) \cdot e^{\frac{-R_1+R_0}{L_1}t}. \qquad (5)$$

Максимальное значение тока будет при $t = 0$, а минимальное при $t = t_4$.

Трансформатор T представляет собой систему индуктивно-связанных катушек для которой мгновенное значение напряжения на вторичной обмотке определяется

$$U_2 = K\sqrt{L_1 L_2}\,\frac{d\,i_1}{d\,t},$$

где $0 \le K \le 1$ – коэффициент связи между обмотками;

L_2 – индуктивность вторичной обмотки.

К накопительной индуктивности L_1 предъявляются ряд требований. Так, она должна выдерживать импульс тока i_1 величиной до 2А без перехода в режим насыщения, активное сопротивление обмотки должно быть не более 0,05 Ом и обеспечивать режим непрерывного преобразования, т. е. без перехода в прерывистый режим. Для этого величина L_1 должна удовлетворять следующему эмпирическому неравенству [7]

$$L_1 > \frac{U_{\min}^2\left(U_{вых\max} - U_{вых\min}\right)}{f\, I_{1\max} \cdot \Delta I \cdot U_{вых\max}},$$

где $U_{\min}$ – минимальное значение входного напряжения U;

f – частота преобразования в кГц;

$U_{вых\max}$ – амплитудное значение выходного напряжения;

$U_{вых\min}$ – минимальное значение $U_{вых}$;

$I_{1\max} = \frac{I_{вых}}{n}$ – ток в первичной обмотке;

$\Delta I_1 = 0{,}4 \div 0{,}6$ – размах пульсаций тока I_1 через индуктивность L_1.

Сердечник импульсного трансформатора обычно выполняется на кольцевом феррите с относительной магнитной проницаемостью $« = 1000$.

Для выбора типа и площади поперечного сечения сердечника воспользуемся выражением, приведенным в [7]

$$S = \frac{2® \, L_1\left(r_1 - r_2\right)}{«_0 « \, n_1^2},$$

где r_1 и r_2 – наружный и внутренний диаметр ферритового сердечника.

ШИМ представляет собой известную микросхему, на один вход которой подаем сигнал пропорциональный выходному напряжению $U_{вых}$. Второй вход подключен к датчика тока R_0, сигнал которого ограничивает максимальный ток нагрузки.

Пересечение транспортных магистралей, улиц, переходов образуют различного вида перекрестки – наиболее опасные участки, особенно в вечернее время, на которых скапливаются транспортные средства и пешеходы. На перекрестках устанавливаются светофоры, работающие по жесткой программе.

Надежное и достаточное освещение этих наиболее опасных участков значительно снижает аварийность. Следовательно, необходимы светильники, обладающие вероятностью безотказной работы $P(t)$ за определенный интервал времени t. Для определения $P(t)$ необходимо знать сумму интенсивностей отказов $\lambda(t)$ всех элементов схемы входящих в состав светильника. Интенсивность отказа элемента есть отношение приращения числа отказавших Δn за время Δt к количеству N элементов продолжающих исправно работать в течении времени t

$$\lambda(t)=\frac{1}{N}\cdot\frac{\Delta n}{\Delta t}.$$

Вероятность безотказной работы светильника определяется по экспоненциальному закону

$$P(t)=e^{-\Lambda(t)},$$

при условии, что $\Lambda(t)$ не меняется за время t.

Зная суммарную интенсивность отказов, можно определить другую важную характеристику – среднее время безотказной работы

$$T_{O_M}=\frac{1}{\Lambda(t)}.$$

На основании приведенной в технической литературе информации известно, что $T_O \approx 30000$ часов для светодиодных матриц, но расчетное время наработки на отказ стабилизованного источника составляет лишь $T_{O_{CT}} \le 10000$ часов. Сопоставив эти два значения, можно прийти к выводу, что обеспечения работы светильника целесообразно ввести общее «холодное» резервирование с замещением [8].

Такой вариант резервирования можно обеспечить на основе функциональной схемы, приведенной на рис. 5.

Функциональная схема состоит из: оптотиристорных силовых ключей $K1; K2$, автоматически переключающего устройства *ПУ*; двух стабилизированных источников *СИ*1 и *СИ*2; разделительных диодов $VD1$ и $VD2$; светодиодных матриц *СМ*. Рассмотрим работу схемы: в том случае, если *СИ*1 исправен стабилизированное напряжение через *VD*1 подается на светодиодную матрицу *СМ*, ключ *К*2 закрыт и *СИ*2 отключен. При неисправности *СИ*1 ключ *К*2 переключающее устройство, выполненное на триггере Шмидта, через 0,01 с включает оптоти-

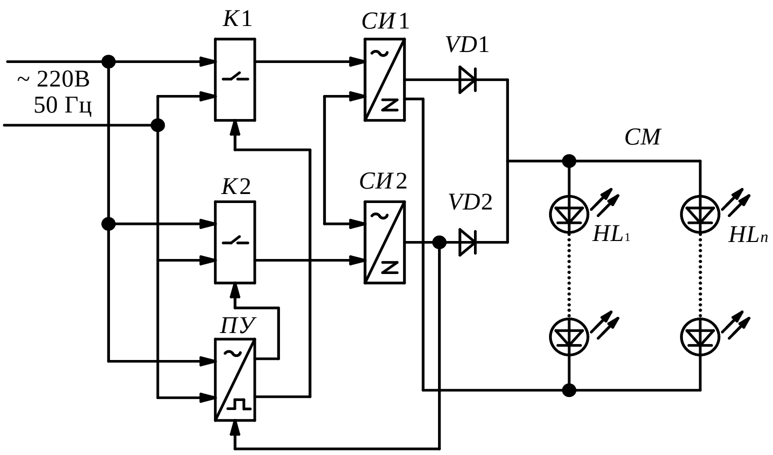

Рис. 5. Схема «холодного» резервирования источников

ристоный ключ *К*2, источник *СИ*2, диод $VD2$. Таким образом обеспечивается питание *СМ* необходимым напряжением. Этот вид резервирования позволяет повысить надежность светильника

$$P_{св(t)}=\left[1-\left(1-p^2\right)\cdot\left(1-p_o p^2\right)\right],$$

где $p-$ вероятность безотказной работы стабилизированного источника *СИ* и иммисторного ключа *К*;

p_o- вероятность безотказной работы переключающего устройства *ПУ*.

Литература

1. Свод правил. Естественное и искусственное освещение: СП 52.13330.2011, СНиП 23-05-95.

2. Світильники. Загальні технічні умови: ГОСТ 17677-82.

3. Сумісність технічних засобів електромагнітна: ГОСТ 51317.3.2-2006.

4. Гігієнічні вимоги до природного, штучного і змішаного освітлення житлових і громадських будівель: СанПіН 2.2.1/2.1.1.2585-10.

5. *ГОСТ МЕК 60598-1-2003.*

6. *Пилипчук Р.В. Світлодіодні системи освітлення житлово-комунального господарства / Р.В. Пилип-чук, В.В. Цвиренко, В.П. Дударчук // Світло. – 2013. – № 6.*

7. *Micropower Synohronaus Buck – Bosr DC/DC Converter. – http:/pdf.eicom.ru datasheets/linear – technoloqy/pdfs/lto3440, lts3440.pdf*

8. *Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 365 с.*

References

1. A vault governed. Natural and artificial illumination (*SP 52.13330.2011, SNiP 23-05-95*).

2. Lamps. General technical requirements (*GOST 17677-82*).

3. Hardware compatibility is electromagnetic (*GOST 51317.3.2-2006*).

4. Hygienical requirements to natural, artificial and mixed illumination of housing and public building (*SanPiN 2.2.1/2.1.1.2585-10*).

5. GOST MEK 60598-1-2003.

6. Pilipshuk P.B., Svirenko B.B., Dudarshyk D.P. (2013). Light-emitting-diode systems of illumination of housing and communal services. *Light, 6.*

7. Micropower Synohronaus Buck – Bosr DC/DC Converter. Retrieved from http:/pdf.eicom.ru datasheets/linear – technoloqy/pdfs/lto3440, lts3440.pdf

8. Wentzel E.S. (1969). Probability theory. 365.

Рецензент: Говоров Ф.П
д-р техн. наук, проф., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, г. Харьков.

Автор: БЕЛОУСОВ Александр Федорович
кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова
E-mail – unf@ukr.net

Автор: БЕЛОУСОВ Дмитрий Александрович
ООО «Евросвязь», инженер
E-mail – unf@ukr.net

ДЖЕРЕЛО СВІТЛА НА ПОНАДЯСКРАВИХ СВІТЛОДІОДАХ

О.Ф. Білоусов, Д.О. Білоусов

Наведені результати дослідження: одного світлодіода, двох матриць, зворотньоходового перетворювача напруги призначеного для живлення світлодіодних матриць. На основі аналізу електромагнітних процесів, що відбуваються в силовому ключі визначені параметри накопичувальної індуктивності, транзисторного силового ключа, ШІМ регулювальника.

Ключові слова: *зворотньоходовий перетворювач, накопичувальна індуктивність, ШІМ регулятора, вірогідність безвідмовної роботи, резервування, перемикальне пристрій, інтенсивність відмов.*

LIGHT SOURCE FOR SUPERBRIGHT LEDs

A.F. Beloysov, D.A. Beloysov

Outdoor lighting highways, streets, yards is important for people living in cities, towns and other settlements because it reduces accidents and reduces kremenogennuyu situation.

Based on the requirements of electric energy conversion into light with the greatest efficiency, and in view of their long life, light fixtures for outdoor lighting advisable ful-lnyat on the matrix consisting of the powerful superbright LEDs. For food matrices used flyback converters DC-driven integrated microcontroller PWM covered feedback output voltage and current. In the first cycle of transformation, when the power switch is opened, executed on a powerful high-voltage transistor, the primary winding of the pulse transformer magnetic energy glows equal $W_M = \frac{L_1 U^2 \left(1 - e^{\frac{-R_1 + R_0}{L_1} t_4}\right)^2}{2(R_1 + R_0)^2}$.

In the second cycle conversion power switch is closed and opened isolating diodes, magnetic energy is transferred through the secondary winding to the load (LED matrix). By varying the open state of the power key the time is maintained constant load voltage.

W_M *number of magnetic energy depends on the inductance of the primary winding of the pulse transformer and* L_1 *duration of the open state of the power key. The value of inductance* L_1 *should be allocated from the condition:* $L_1 > \frac{U^2_{\min}\left(U_{вых\max} - U_{вых\min}\right)}{f\, I_{1\max} \cdot \Delta I \cdot U_{вых\max}}$*, where* $U_{\min}$ – *is the minimum value of the input voltage;* f – *conversion frequency in kHz;* $U_{вых\max}$ – *amplitude value of the output voltage;* $U_{вых\min}$ – *minimum value* $U_{вых}$*;* $I_{1\max} = \frac{I_{вых}}{n}$ – *current in the primary winding;* $\Delta I_1 = 0{,}4 \div 0{,}6$ – *scope of ripple current* I_1 *through the inductor* L_1.

The intersection of highways, streets, pedestrian crossings to form various types of intersections at which accumulate vehicles and pedestrians. This is the most dangerous areas, so they are reliable lighting reduces accidents.

When calculating the probability of failure of the lamp it was found that the most prone to failure DC power supply, the power supply LED matrix.

To increase the reliability of the lighting is offered on such sites to install lamps with a "cold" backup, able to two-stabilized source, but one of them has priority. If it fails, it automatically switches to another previously not working, but being in the "cold" reserve. For such a lamp is determined by the probability of failure of $P_{св(t)} = \left[1 - \left(1 - p^2\right) \cdot \left(1 - p_o p^2\right)\right]$*, where* p – *is the probability of failure-free operation and a stabilized power immistornogo key K;* p_o – *probability of failure of the switching device.*

Keywords: *obratnokhodovy the converter, accumulative inductance, ShIM the regulator, probability of no-failure operation, the reservation switching the device, failure rate.*