

М.А. Поляков, Т.Ю. Ларионова

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Розроблено методику оцінки ефективності використання силового напівпровідникового перетворювача постійної напруги в системі електропостачання. Методика включає виявлення множини зовнішніх чинників, що впливають на ефективність використання перетворювача; розробку моделі оцінки ефективності як функції зовнішніх чинників; вибір варіанта використання перетворювача; встановлення коефіцієнтів кореляції між значеннями зовнішніх чинників; визначення значень ККД перетворювача; знаходження розподілу ККД перетворювача. Застосування запропонованої методики проілюстровано на прикладі синхронного проміжного вольтдобавкового перетворювача постійної напруги. Для цієї мети виконано статистичне моделювання перетворювача цього типу при стохастичній зміні вхідної напруги. Бібл. 10, рис. 8.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач, ефективність використання перетворювача, статистичне моделювання, оцінка ефективності, ККД перетворювача.

Разработана методика оценки эффективности использования силового полупроводникового преобразователя постоянного напряжения в системе электроснабжения. Методика включает выявление множества внешних факторов, влияющих на эффективность использование преобразователя; разработку модели оценки эффективности как функции внешних факторов; выбор варианта использования преобразователя; установление коэффициентов корреляции между значениями внешних факторов; определение значений КПД преобразователя; нахождение распределения КПД преобразователя. Применение предложенной методики проиллюстрировано на примере синхронного промежуточного вольтдобавочного преобразователя постоянного напряжения. Для этой цели выполнено статистическое моделирование преобразователя этого типа при стохастическом изменении входного напряжения. Библ. 10, рис. 8.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, эффективность использования преобразователя, статистическое моделирование, оценка эффективности, КПД преобразователя.

Введение. Для удовлетворения потребностей в электроэнергии разных видов и параметров, а также для эффективного управления ее распределением необходимы различные преобразовательные устройства. Важным требованием, которое предъявляется к преобразователям, является обеспечение высокой эффективности.

Силовые полупроводниковые преобразователи имеют высокую эффективность, поэтому широко применяются в промышленном оборудовании и электротранспорте [1].

Для количественной оценки эффективности используется коэффициент полезного действия (КПД), равный отношению выходной мощности (или энергии) к мощности, потребляемой преобразователем от сети, при определенном входном напряжении и нагрузке, чаще всего номинальных. Для преобразователей величина КПД приводится в документации и является одним из важных показателей. Снижение КПД в преобразователях обусловлено потерями в электро-радиоэлементах преобразователя – силовых полупроводниковых приборах (СПП), трансформаторах, индуктивностях, емкостях. Основные виды потерь в преобразователях – это коммутационные потери, возникающие при коммутации силовых ключей, и потери на проводимость [2]. Известные исследования [3-5] направлены на нахождение максимальной эффективности преобразователя, которая достигается выбором топологии, оптимизацией параметров пассивных компонентов, применением СПП с низким значением сопротивления в проводящем состоянии и потерь при

переключении, выбором алгоритма коммутации и частоты переключения СПП. Величина КПД также зависит от внешних факторов, таких как входное напряжение, сопротивление нагрузки и др. Существует ряд областей применения полупроводниковых преобразователей, для которых характерно изменение в широких пределах входного напряжения и тока нагрузки. Это преобразователи для ветроэнергетики, источников питания от аккумуляторных батарей, электротранспорта и другие. Исследователи [6] выявили зависимости $E = f(V_{in}, I_o)$, которые имеют экстремум в области средних значений диапазонов изменения V_{in} и I_o . Например, входное напряжение преобразователя системы питания собственных нужд (СПСН) электроподвижного состава (ЭПС) меняется в широких пределах (на токоприемнике электроподвижного состава с номинальным напряжением 3000 В – от 2200 до 3850 В [7]). В этом случае преобразователь СПСН большую часть времени работает в неоптимальных условиях, эффективность его применения снижается. [8].

Постановка задачи. Само по себе значение КПД не дает полной информации о величине потерь энергии в преобразователе в конкретном его применении в системе электроснабжения, так как режим использования преобразователя может отличаться от того, в котором производилось измерение КПД. В реальных условиях преобразователь работает в некотором диапазоне КПД. Следовательно, для усредненной оценки эффективности использования преобразователя

в системе электроснабжения требуется учитывать характер изменения во времени входного напряжения и нагрузки. В зависимости от области применения преобразователя эти изменения могут носить как детерминированный, так и стохастический характер.

Цель работы – оценка эффективности использования силового полупроводникового преобразователя постоянного напряжения в системе электроснабжения при стохастическом изменении его входного напряжения.

Для оценки распределения КПД и определения соответствующей интегральной функции распределения в работе применен метод статистического моделирования Монте-Карло.

Результаты исследований.

Предложенная методика включает следующие этапы:

1. Выявление множества внешних факторов A_{ext} , от которых зависит КПД преобразователя. Как правило, это напряжение V_{in} и ток I_o .

2. Разработка модели оценки КПД преобразователя как функции внешних факторов $\text{КПД} = f(A_{ext})$. Как известно, КПД преобразователя определяется потерями в элементах его схемы. Эти потери зависят от номиналов и качества элементов схемы, топологии и алгоритмов коммутации ключей преобразователя. На этапе разработки модели оценки КПД выявляются зависимости составляющих потерь от значений внешних факторов.

3. Выбор варианта использования преобразователя, который описывается некоторым временным интервалом $[t_1, t_2]$, длительностью Δt , характеристиками изменения во времени значений внешних факторов $A_{ext} = f(t)$, $t \in [t_1, t_2]$, включая диапазон возможных значений $[A_{ext_min}, A_{ext_max}]$ и продолжительность воздействия на преобразователь внешнего фактора со значением A_{ext} . При стохастическом характере изменений во времени значений внешних факторов $A_{ext(i)}$ определить функцию плотности распределения значения $A_{ext(i)}$ на входе модели преобразователя.

4. Определение коэффициентов корреляции между значениями внешних факторов на входах модели преобразователя. Эти коэффициенты учитываются при задании значений зависящих друг от друга внешних факторов. Например, интеллектуальная система управления электроснабжением может ограничить нагрузку при снижении напряжения V_{in} до критического значения.

5. Расчет КПД преобразователя путем моделирования его работы с заданными значениями внешних факторов для каждого подынтервала Δt_i принадлежащего интервалу Δt . Для стохастически изменяющихся внешних факторов провести серию экспериментов с моделью преобразователя и значениями входных факторов, которые выбираются случайным образом с учетом вероятности появления данного значения.

6. Разбиение полученных в результате моделирования значений КПД на диапазоны и определение относительной частоты появления значений КПД, принад-

лежащих каждому интервалу. Определение на основании полученных частот плотности распределения и интегральной функции распределения КПД преобразователя для выбранного варианта его использования.

Проиллюстрируем предложенную методику на примере оценки эффективности использования синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения при случайном изменении входного напряжения. Функциональная схема рассматриваемого преобразователя приведена на рис. 1 [9].

Для оценки эффективности преобразователя выполняем действия согласно предложенной методике.

1. В качестве входного фактора выбрано V_{in} , которое, как было отмечено выше, существенно влияет на КПД преобразователя.

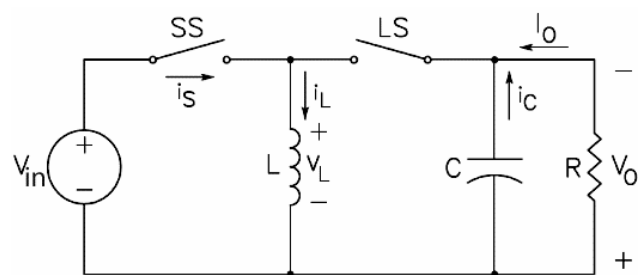


Рис. 1. Функциональная схема синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения

2. Для получения зависимости эффективности преобразователя от напряжения, меняющегося случайным образом, выполнено моделирование синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения. За основу модели взята Simulink модель синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения с подсистемой, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь и КПД преобразователя [9].

На рис. 2 представлена модель синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения, а на рис. 3 – подсистемы, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь и КПД преобразователя. В модели учтены основные факторы, влияющие на эффективность преобразователя: сопротивление ключа в открытом состоянии; прямое напряжение сток-исток; коэффициент заполнения; рабочая частота; время спада и нарастания фронтов при коммутации ключа; статические и динамические потери в индукторе и на эквивалентном последовательном сопротивлении конденсатора.

Приведенная на рис. 3 модель для расчета КПД (efficiency) определяет мощность потерь в преобразователе как сумму мощностей потерь на переключении в ключах (SS Switch Loss и LS Switch Loss), мощностей потерь в ключах в проводящем состоянии (SS Conduction Loss и LS Conduction Loss), потери во «внутренней» диоде ключа (LS Body Diode Loss), потери за счет «мертвого времени» (Dead-Time Loss).

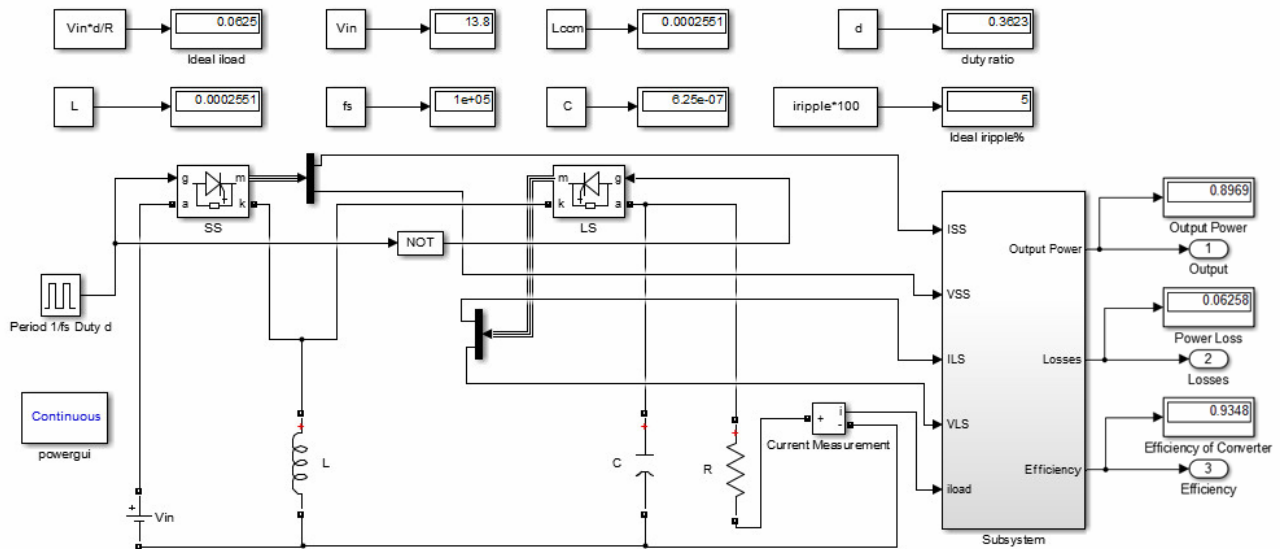


Рис. 2. Модель синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения

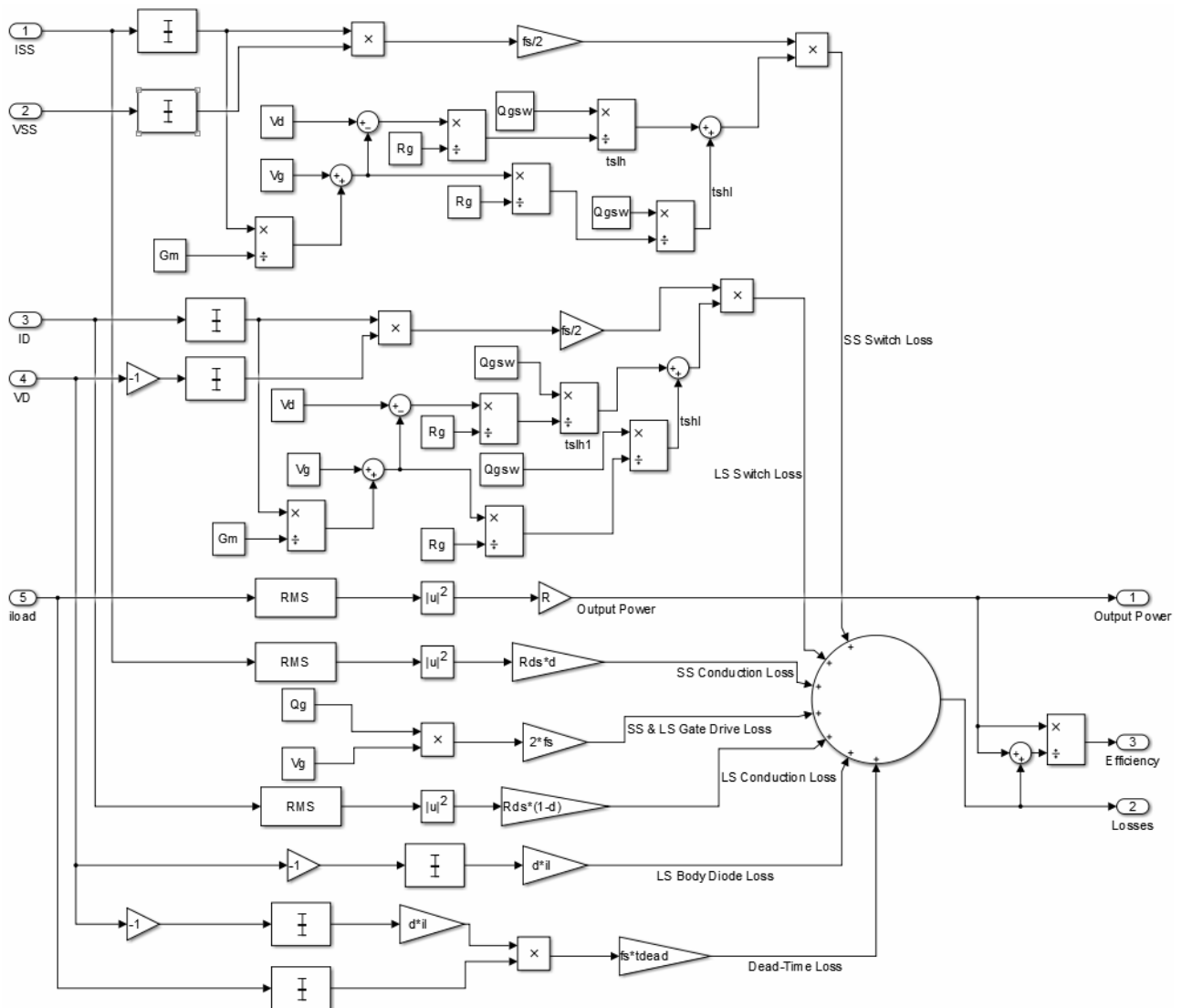


Рис. 3. Модель подсистемы, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь, эффективности

Не указанные в работе [9] значения параметров элементов модели преобразователя приведены в листинге *m*-файла (рис. 4).

```
%Параметры преобразователя
Vin=13.8; %номинальное входное напряжение, В
Vout=5; %требуемое выходное напряжение, В
fs=100e3; %частота переключения, 1/с
vripple=0.05; %максимально допустимая
%пульсирующая компонента напряжения
iripple=0.05; %максимально допустимая
%пульсирующая компонента постоянного тока
R=80; %нагрузка, Ом (чистая резистивная нагрузка)
P=1/fs; %период регулирования, с
d=Vout/Vin; %коэффициент заполнения

Lccm=((Vin-Vout)*R)/(2*fs*Vin); %минимальное значение
%индуктивности, Гн
Lambda=(2/iripple)*(Vout/R); %коэффициент масштабирования
%катушки индуктивности
L=Lccm; %индуктивность при минимальном значении для
%режима непрерывного тока, Гн
C=(1-(Vout/Vin))/(8*L*vripple*fs^2); %емкость конденсатора, Ф
Qgs=20e-9; %заряд затвора MOSFET в точке переключения, Кл
Qg=175e-9; %полный заряд затвора MOSFET в точке переключения, Кл
il=0.15; %ток включения, А
tdead=60e-9; %потери на время задержки, с
Rds=0.5; %PMOS прямое сопротивление во включенном состоянии, Ом
Gm=0.32e-3; %MOSFET активная межэлектродная проводимость, См
Vg=3; %MOSFET напряжение переключения, В
Rg=50; %MOSFET сопротивление затвора, Ом
Vd=0.8; %напряжение на диоде, В
```

Рис. 4. Листинг *m*-файла задающего параметры элементов схемы преобразователя

3. Моделируем условия характерные для работы преобразователя СПСН ЭПС. Напряжение на его входе такого преобразователя (V_{in}) зависит от напряжения тяговой подстанции, местоположения ЭПС относительно точек подвода этого напряжения к контактно-проводу, наличия других нагрузок на участке данной подстанции, метеос условиями и другими факторами, носящими случайный характер. Согласно положения центральной предельной теоремы А.М. Ляпунова, если случайная величина x представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало, то x распределена по закону, близкому к нормальному [10]. Поэтому полагаем, что входное напряжение преобразователя V_{in} имеет нормальное распределение.

Плотность случайной величины V_{in} имеет вид [7]:

$$f(V_{in}; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V_{in}-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ – среднее значение (номинальное входное напряжение преобразователя); σ – стандартное отклонение.

Для преобразователя постоянного напряжения СПСН ЭПС [7, 10] $\mu = 3000$ В и $\sigma = 2,1$. При моделировании схемы (рис. 2) принято $\mu = 13,8$ В и $\sigma = 2,1$.

Случайные значения μ сгенерированы с помощью функций НОРМ.ОБР и СЛЧИС программы Microsoft Excel пакета Microsoft Office 2010.

График плотности вероятности распределения входного напряжения приведен на рис. 5. Сгенерированная выборка состоит из 100 значений. При таком числе значений максимальное относительное отклонение сгенерированной плотности распределения от плотности распределения, определенной по формуле (1),

не превышает 12 % (рис. 6), что является допустимым в инженерных расчетах.

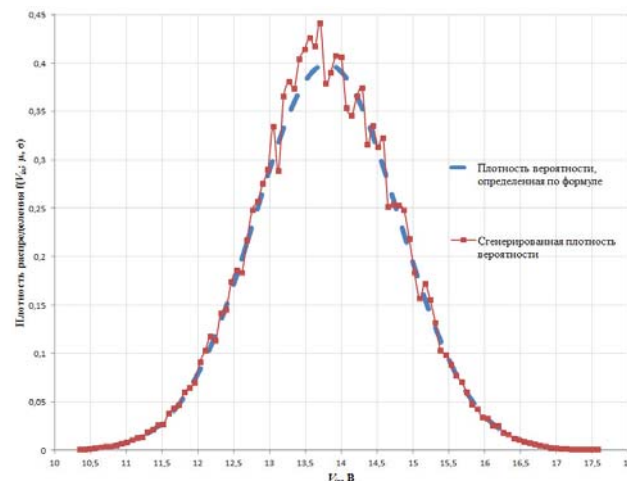


Рис. 5. График плотности вероятности сгенерированной и определенной по формуле (1) плотности распределения величины входного напряжения V_{in}



Рис. 6. Относительное отклонение сгенерированной плотности распределения

4. Так как в примере рассматривается влияние только одной величины (входного напряжения) на эффективность преобразователя, то корреляции между значениями влияющих факторов отсутствуют.

5. Для сгенерированных случайных значений V_{in} выполнено моделирование токов в ветвях и напряжений в узлах схемы, а также моделирование выходной мощности, потерь и КПД преобразователя. Результаты моделирования при сопоставимых входных данных совпадают с точностью до 1 % с данными, полученными в работе [10].

6. В результате выполнения серии экспериментов получено 100 значений эффективности преобразователя, которые находятся в диапазоне от 0,9187 до 0,9584. Далее этот диапазон разбит на интервалы (в примере – 0,005) и определены относительная и абсолютная частота встречаемости значения эффективности в пределах каждого интервала. На основании этих данных построен график плотности распределения КПД преобразователя (рис. 7) и интегральная функция распределения КПД преобразователя (рис. 8).

Графику рис.6 соответствует распределение:

$$f(E; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где E – КПД преобразователя; μ – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

В соответствии с графиком, представленном на рис. 7, $\mu = 0,935$, а $\sigma = 0,016$.

В соответствии с графиком (рис. 8), вероятность того, что КПД преобразователя в данных условиях применения будет равна не менее 0,935, составит 0,65. Таким образом, учет рисков снижения КПД на основе предложенной интегральной оценки позволяет уточнить оценку эффективности использования преобразователя в конкретном применении.

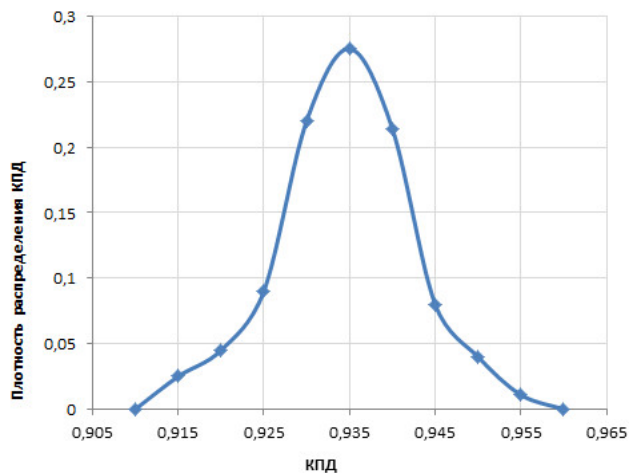


Рис. 7. График плотности распределения КПД преобразователя, построенный по результатам статистического моделирования

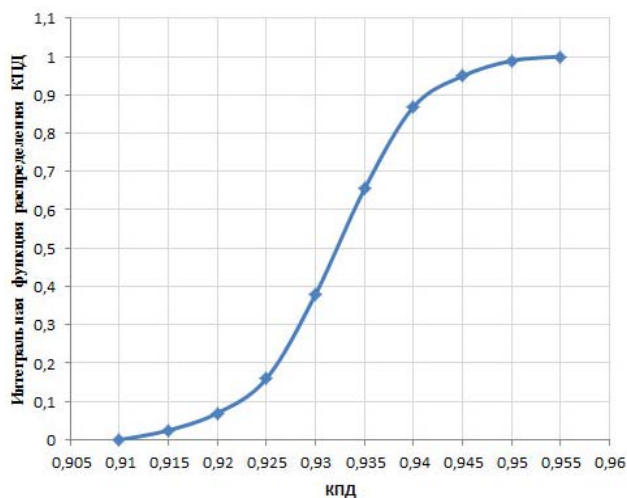


Рис. 8. Интегральная функция распределения КПД преобразователя

Выводы.

1. КПД преобразователя напряжения, рассчитанное при фиксированных внешних факторах, не является показателем эффективности использования преобразователя в условиях изменяющихся внешних факторов, особенно когда их изменение носит стохастический характер.

2. Эффективность использования преобразователя в системе электроснабжения может быть оценена путем статистического компьютерного моделирования, в ходе которого определяются зависимости токов и напряжений в преобразователе от времени, а также рассчитываются потери в преобразователе, его выходная мощность и КПД.

3. При оценке эффективности использования преобразователя в системе электроснабжения при стохастическом изменении внешних факторов необходимо учитывать не только ожидаемое среднее значение, но и риски снижения КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковая схемотехника: [справ. руководство]: пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 144 с.
3. Gildersleeve M., Forghani-zadeh H.P., Rincon-Mora G.A. A Comprehensive Power Analysis and a Highly Efficient, Mode-Hopping DC-DC Converter // *Proceedings. IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC*. – September 2002. – pp. 153-156. doi: 10.1109/apasic.2002.1031555.
4. Arvind Raj. Application Report. Calculating Efficiency. PMP-DCDC Controllers [Электронный ресурс]: SLVA390 – February 2010. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf>.
5. Chen M., Afridi K.K., Chakraborty S., Perreault D.J. A high-power-density wide-input-voltage-range isolated dc-dc converter having a MultiTrack architecture // *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2015. doi: 10.1109/ecce.2015.7309945.
6. Nowakowski R., Tang Ning. Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters // *Texas Instruments Analog Applications Journal*. –2009. – no.4Q. – pp. 15-18.
7. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 8 с.
8. Ларионова Т.Ю. Сравнение систем питания собственных нужд электроподвижного состава постоянного тока напряжением 3000 В по энергоэффективности // *Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського*. – 2015. – №3(92). – С. 34-39.
9. Katsikis V. MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1. – InTech Publisher, 2012. – 534 p. doi: 10.5772/2557.
10. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Изд. 2-е, стереотип. – К.: «Техніка», 1977. – 768 с.

REFERENCES

1. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaja shemotekhnika* [Semiconductor engineering]. Moscow, Mir Publ., 1983. 512 p. (Rus).
2. Lukutin B.V., Obuhov S.G. *Silovye preobrazovateli v elektrosnabzhenii* [Power converters in electricity supply]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 144 p. (Rus).
3. Gildersleeve M., Forghani-zadeh H.P., Rincon-Mora G.A. A Comprehensive Power Analysis and a Highly Efficient, Mode-Hopping DC-DC Converter. *Proceedings. IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC*, September 2002, pp. 153-156. doi: 10.1109/apasic.2002.1031555.
4. Arvind Raj. *Application Report. Calculating Efficiency. PMP-DCDC Controllers: SLVA390* – February 2010. – Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf> (accessed September 28, 2015).
5. Chen M., Afridi K.K., Chakraborty S., Perreault D.J. A high-power-density wide-input-voltage-range isolated dc-dc converter having a MultiTrack architecture. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2015. doi: 10.1109/ecce.2015.7309945.

6. Nowakowski R., Tang Ning. Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters. *Texas Instruments Analog Applications Journal*, 2009, no.4Q, pp. 15-18.
7. GOST 6962-75. *Transport elektrifitsirovannyj s pitaniem ot kontaktnoj seti. Rjad naprjazhenij* [State Standard 6962-75. Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1975. 8 p. (Rus).
8. Larionova T.Y. Comparison of the auxiliary power supply systems of the electric railway rolling stock DC 3000 V according to the energy efficiency *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2015, no.3(92), pp. 34-39. (Rus).
9. Katsikis V. *MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1*. InTech Publisher, 2012. 534 p. doi: 10.5772/2557.
10. Sigorskij V.P. *Matematicheskij apparat inzhenera. Izd. 2-e, stereotip*. [Engineer's mathematical apparatus. 2nd ed. stereo-type]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1977. 786 p. (Rus).

Поступила (received) 20.04.2016

Поляков Михаил Алексеевич¹, к.т.н., доц.,
Ларионова Татьяна Юрьевна¹, аспирант,

¹ Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +380 61 7698395,
e-mail: polyakov@zntu.edu.ua, electro-eng@yandex.ru

M.A. Polyakov¹, T.Y. Larionova¹

¹ Zaporozhye National Technical University,
64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

Efficiency evaluation technique of the semiconductor DC-DC converter application in the power-supply system.

Purpose. To specify efficiency evaluation of the DC-DC power semiconductor converter application in the power-supply system.

Methodology. We have chosen application version of converter and then used the statistical modeling of DC-DC converter for its efficiency evaluation at varied input voltage according to proposed technique. We have compared the simulated result with the data presented in reference literature. **Results.** We have proposed the efficiency evaluation technique of converter application. Proposed technique includes detection of external factors influenced on the converter efficiency; development of efficiency evaluation models; selecting application version of converter; determination of the correlation coefficients between the values of external factors; definition of the converter efficiency; obtaining of the converter efficiency distribution. **Originality.** For the first time, we have developed the evaluation technique of converter efficiency corrected for application version of converter. **Practical value.** Presented in the study results could be useful for specialists in semiconductor equipment, electrical facilities and systems. References 10, figures 8.

Key words: semiconductor converter, efficiency of converter application, statistical modeling, evaluation of the effectiveness, converter efficiency.