УДК 62-83:621.313.3
DOI: 10.12737/24914

В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Н.Н. Стрекалов

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Разработаны функциональная и структурная схемы автоматической системы регулирования температуры силовых приборов тягового полупроводникового преобразователя частоты. Рассмотрены особенности силовых приборов как объекта регулирования температуры, предложена эквивалентная схема замещения тепловых процессов в полупроводниковых ключах, проведена сравнительная оценка мощности потерь энергии в двух- и трехуровневых инверторах напряжения. Проанализированы динамические свойства электропривода вентилятора охлаждения с асинхронным двигателем с системой скалярного управления. Разработаны рекомендации по выбору и расчету регуляторов температуры.

Ключевые слова: тяговый электропривод, транзистор, диод, температура, система управления, эквивалентная схема замещения, скалярное управление, частота коммутации.

V.I. Vorobiyov, A.A. Pugachev, N.N. Strekalov

TEMPERATURE CONTROL OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES OF TRACTION CONVERTER

The functional and structural circuits of an automatic system for temperature control of power devices of a traction semiconductor converter of frequency are developed. The peculiarities of power devices as an object of temperature control are considered, an equivalent circuit of thermal processes substitution in semiconductor keys is offered, a comparative assessment of capacity of power loss in two- and three-level inverters of voltage is carried out. The dynamic properties of an electro-drive of a cooling fan with an asynchronous motor with a system of scalar control are analyzed. The recommendations on choice and computation of temperature control are developed.

Key words: traction electro-drive, transistor, diode, temperature, control system, equivalent circuit of substitution, scalar control, commutation frequency.

Опыт эксплуатации силовых полупроводниковых приборов (транзисторы, диоды и др.) в тяговых полупроводниковых преобразовательных установках на тяговом подвижном составе и в энергоснабжении показывает, что основные повреждения этих приборов при импульсных тепловых нагрузках обусловлены процессами термомеханического старения припоев, повреждениями контактов между силовыми полупроводниковыми приборами и охладителями, вызываемыми значительными колебаниями температуры при нерегулируемом охлаждении [1]. С температурой силовых полупроводниковых приборов и тяговых полупроводниковых преобразовательных установок и характером ее изменения непосредственно связаны показатели надежности данных приборов и установок: интенсивность отказов и циклостойкость. Оценочные расчеты показывают, что при изменении температуры силовых полупроводниковых приборов на 10°С интенсивность отказов увеличивается в среднем на 25%. При увеличении амплитуды колебаний температуры силовых полупроводниковых приборов значительно снижается циклостойкость. Расчеты показывают, что один процент уменьшения амплитуды колебаний температуры прибора – в 5 раз более эффективная мера повышения его надежности по сравнению с таким же снижением его средней температуры.

Стабилизация температурных режимов необходима для повышения надежности тяговых полупроводниковых преобразовательных установок и их систем охлаждения и уменьшения затрат энергии на охлаждение.

Известно, что процессы, протекающие в полупроводниковых приборах, носят нестационарный характер как в токовом, так и в тепловом режимах. Рассматривают несколько видов изменений тепловой нагрузки: сезонные изменения температуры окружающей среды в течение года;

суточные изменения температуры; территориальные изменения температуры в процессе движения поезда к станции назначения.

Современные автоматические системы регулирования температуры (АСРТ) преобразователей в ряде случаев не могут или, в силу инерционности системы, не успевают обеспечить требуемый температурный режим работы структуры, что может привести к повышению температуры выше допустимой и вызвать тепловое повреждение структуры, являющееся крайне нежелательным, так как тепловой пробой полупроводниковой структуры необратим. В результате этого в эксплуатации часто имеют место тепловые повреждения структуры полупроводниковых модулей. При создании АСРТ полупроводниковых приборов должны учитываться многие факторы, которые могут вызвать повреждения модулей в процессе эксплуатации, с целью предупреждения данных повреждений и выбора таких алгоритмов работы АСРТ и устройств защиты преобразователя, при которых вероятность наступления любого аварийного режима сводилась бы к минимуму.

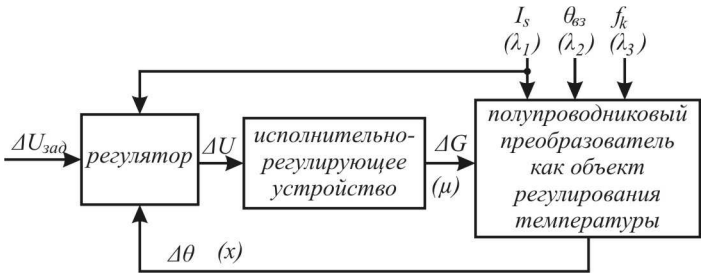

Рис. 1. Структура АСРТ полупроводникового преобразователя: μ - регулирующее воздействие; x – регулируемая переменная; λ_i – возмущения; $\Delta\theta$ – изменение температуры полупроводниковых приборов; $\Delta U_{зад}$ – изменение задания; ω – изменение частоты вращения вала вентилятора; ΔG – изменение расхода охлаждающего воздуха; I_s – ток статора тягового двигателя; $\theta_{вз}$ – температура охлаждающего воздуха; f_k – частота коммутации транзисторов

Общая структура предлагаемой АСРТ тягового преобразователя частоты с системой принудительного воздушного охлаждения приведена на рис. 1. Выбор системы воздушного охлаждения обусловлен тем, что она применяется на современных магистральных тепловозах, включая тепловоз 2ТЭ25А.

Для построения АСРТ должны быть известны статические и динамические свойства объекта регулирования, исполнительно-регулирующего устройства и рассчитаны параметры регулятора, которые могут быть реализованы в различных моделях.

Ниже рассмотрим вкратце особенности каждого из приведенных звеньев.

Динамические свойства силовых приборов как объекта регулирования температуры зависят от структуры полупроводникового модуля, шероховатости в местах соединения различных структур, типа охлаждения и т.д. Существует достаточно большое количество работ, посвященных проблеме исследования теплового состояния транзисторов и диодов. На рис. 2 а приведена эквивалентная схема замещения тепловых процессов в модуле, содержащем параллельно включенные транзистор и диод, предложенная в [2]. На рис. 2 и далее по тексту индекс *VT* относится к транзисторам, индекс *VD* – к диодам. Высокая сходимость достигается при 3 *RC*-цепочках на каждый прибор ($C = \tau/R$, где τ – постоянная времени). Применение этой схемы осложняется достаточно большим количеством неизвестных, информация о которых не предоставляется в стандартной документации на полупроводник. Еще один недостаток этой схемы – отсутствие физического смысла каждого элемента. Другой вариант схемы замещения предложен на рис. 2 б. Он также апробирован в ряде работ, например в [3], и его применение дает удовлетворительную сходимость с экспериментальными результатами.

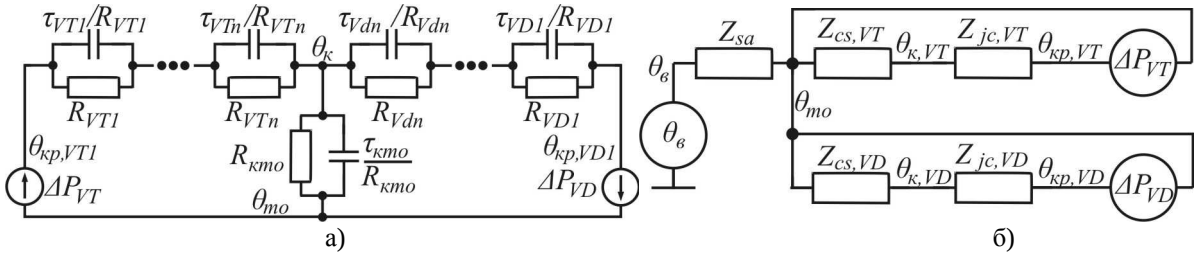

Рис. 2. Эквивалентные тепловые схемы замещения полупроводниковых модулей: Z_{sa} – динамическое тепловое сопротивление «охладитель - охлаждающий воздух»; Z_{cs} – динамическое тепловое сопротивление «корпус – охладитель»; $Z_{jc,VT}$, $Z_{jc,VD}$ – динамические тепловые сопротивления «кристалл - корпус» транзистора и диода соответственно; $\theta_{то}$, $\theta_к$, $\theta_{кр,VT}$, $\theta_{кр,VD}$ – температуры охладителя, корпуса и кристалла транзистора и диода соответственно; $\theta_в$ – температура охлаждающего воздуха; ΔP_{VT}, ΔP_{VD} – суммарная мощность потерь в транзисторе и диоде соответственно

При исследовании установившихся режимов динамическое тепловое сопротивление можно представить следующим образом:

$$Z_{xy}(t) = R_{xy}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{xy}}}\right),$$

где R_{xy} – тепловое сопротивление между сопряженными узлами x и y; τ_{xy} – постоянная времени теплового переходного процесса.

Связь между сопротивлением и температурой определяется выражением

$$R_{xy} = \frac{\theta_x - \theta_y}{\Delta P}.$$

Следует отметить, что мощность потерь моделируется источником тока, температура охлаждающего воздуха – источником напряжения.

Мощность потерь в полупроводниковом преобразователе частоты с автономным инвертором напряжения при питании его от неуправляемого выпрямителя определяется, прежде всего, потерями в вентилях неуправляемого выпрямителя, а также потерями в коммутирующих реакторах и различных фильтрах на входе и выходе преобразователя (в случае их установки), в конденсаторе фильтра звена постоянного тока и силовых ключах автономного инвертора напряжения [4].

Рассмотрим два последних вида потерь, как наиболее значимых при анализе той или иной структуры автономного инвертора.

Анализ и расчет всех потерь осуществляется при следующих допущениях:

- ток нагрузки (обмотки статора) является синусоидальным;
- искажения формы напряжения и тока не учитываются;
- величина «мертвого времени» транзисторов пренебрежимо мала.

С учетом этих допущений мощность потерь в автономном инверторе напряжения определяется выражением

$$\Delta P_{АИН} = 3\Delta P_{эл} + 3\Delta P_{ком},$$

где $\Delta P_{эл}$ и $\Delta P_{ком}$ – статические (электрические) и динамические (коммутационные) потери в силовых ключах трехфазного инвертора на одну фазу.

Выражения для вычисления мощности потерь приведены в работе [4]. Следует отметить, что они содержат большое количество параметров схем замещения, которые в общем случае сами являются функцией температуры полупроводника, поэтому их применение будет вносить дополнительную погрешность. При работе с переменными параметрами силового ключа целесообразнее использовать следующие зависимости, определяющие потери за период коммутации силовых ключей T_k:

$$\Delta P_{эл,VT} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} u_{кэ}(i,\theta) I_{max} \sin(2\pi f_s t)\frac{1+\mu(t)}{2} d(2\pi f_s t),$$

$$\Delta P_{эл,VD} = \frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} u_{эк}(i,\theta) |I_{max} \sin(2\pi f_s t)| \frac{1+\mu(t)}{2} d(2\pi f_s t),$$

$$\Delta P_{ком,VT} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\left(E_{вкл}(i) + E_{выкл}(i)\right)\frac{U_{dc}}{U_{dc,ном}}\frac{1}{T_k}d(2\pi f_s t),$$

$$\Delta P_{восс,VD} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}E_{восс}(i)\frac{U_{dc}}{U_{dc,ном}}\frac{1}{T_k}d(2\pi f_s t),$$

где U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока, индекс *«ном»* соответствует номинальному режиму работы; период коммутации $T_k = 1/f_k$, f_k – частота коммутации.

При моделировании применялись следующие основные параметры полупроводниковых ключей: $U_{пр}$ = 1,0 В, $R_{диф}$=18 мОм, $E_{вкл}+E_{выкл}$ =10,4 мДж (для тока I=45 А) (транзисторы); $U_{пр,д}$ = 1,0 В, $R_{диф,д}$ = 18 мОм (обратные диоды). Нагрузкой инвертора при моделировании являлся асинхронный двигатель с номинальным значением коэффициента мощности 0,86 и номинальным током 37 А.

Результаты расчетов мощности потерь, выполненных с использованием Matlab для двух- и трехуровневого (с фиксирующими диодами) инверторов, приведены на рис. 3. На рис. 3 потери в трехуровневом инверторе показаны без учета потерь в фиксирующих диодах, так как их значение не превышает 5% от электрических потерь остальных диодов и транзисторов. Таким образом, потери в силовых ключах рассматриваемых вариантов трехуровневых инверторов одинаковы. Коммутационные потери в двухуровневом инверторе значительно превышают потери в трехуровневых, причем превышение тем больше, чем выше значение коэффициента модуляции μ. Электрические потери в двух- и трехуровневых инверторах примерно одинаковы.

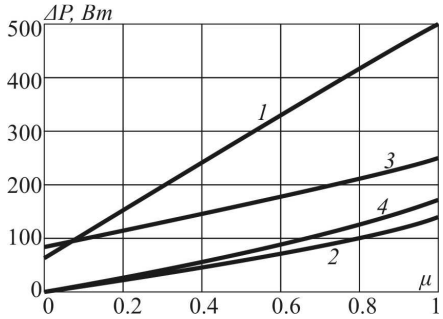

Рис. 3. Мощность потерь в силовых ключах (1 и 2 – мощность коммутационных и электрических потерь в двухуровневом инверторе, 3 и 4 – то же в трехуровневом)

Как показывают исследования, наибольший нагрев во время работы испытывают кристаллы полупроводников. Применительно к схеме (рис. 2 б) выражения для определения температур кристаллов транзистора и диода имеют вид

$$\theta_{кр,VT} = \theta_к + \Delta P_{VT}\sum_{i=1}^{n}R_{i,VT}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{i,VT}}}\right),$$

$$\theta_{кр,VD} = \theta_к + \Delta P_{VD}\sum_{i=1}^{n}R_{i,VD}\left(1 - e^{-t/\tau_{i,VD}}\right).$$

В результате расчетов для силовых ключей с параметрами $R_{cs,VT}$ = 0,085 °С/Вт, $R_{cs,VD}$ = 0,13 °С/Вт, $R_{jc,VT}$ = 0,01 °С/Вт, $R_{jc,VD}$ =0,015 °С/Вт, Z_{sa} =0,031 °С/Вт было установлено, что температура кристалла транзистора $\theta_{кр,VT}$ = 87 °С, температура кристалла диода $\theta_{кр,VD}$ = 101 °С для рассмотренного выше режима работы. Если температура силовых ключей в разных стойках различна, что может произойти при последовательном охлаждении охладителей, то это может привести к неравномерности падений напряжений «коллектор – эмиттер». Даже незначительное расхождение этих напряжений увеличивает значение третьей гармоники тока, что, в свою очередь, вызывает негативные последствия в тяговом двигателе. Таким образом, при разработке средств определения или измерения температуры полупроводниковых приборов тягового преобразователя целесообразно определять температуру силовых ключей всех трех фаз.

Для подачи охлаждающего воздуха к силовым приборам предложено применение электропривода с асинхронным двигателем [5; 6]. Для его управления применена система скалярного управления по закону u/f^2 = *const*. При синтезе систем управления электропривода целесообразно располагать простыми и наглядными динамическими моделями двигателя в виде передаточных функций или структурных схем. Вследствие характера своих нелинейностей электропривод с асинхронным

двигателем может быть линеаризован только в малом, когда предполагаются небольшие отклонения переменных величин от установившихся значений. При этом каждая переменная величина представляется в виде постоянного вектора и небольшого вектора приращения, а дифференциальные уравнения записываются в приращениях относительно заданной точки равновесия – определенной точки механической характеристики. Для определения динамических свойств электропривода вентилятора охлаждения воспользуемся уравнениями обобщенного двигателя:

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} - \omega_k \psi_{s\beta}, u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + \omega_k \psi_{s\alpha},$$

$$0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - (\omega_k - \omega)\psi_{r\beta}, 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + (\omega_k - \omega)\psi_{r\alpha},$$

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_\mu i_{r\alpha}, \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\beta} + L_\mu i_{r\beta}, \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_\mu i_{s\alpha}, \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\beta} + L_\mu i_{s\beta},$$

$$M = \frac{3}{2} p\,(i_{s\beta}\psi_{s\alpha} - i_{s\alpha}\psi_{s\beta}),$$

где $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ – проекции напряжения обмотки статора на соответствующие оси; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ – проекции токов обмоток статора и ротора на соответствующие оси; $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – проекции потокосцеплений статора и ротора на соответствующие оси; R_s, R_r – активные сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки ротора; L_s, L_r, L_μ – индуктивности рассеяния статора, ротора (приведенная) и главная взаимоиндуктивность соответственно; ω_k– частота вращения координатных осей; ω – частота вращения вала ротора; M – электромагнитный момент на валу ротора; p – число пар полюсов обмотки статора.

В результате линеаризации приведенных выражений были получены передаточные функции момента по напряжению, частоте тока статора и частоте вращения вала ротора. Знаменателем всех передаточных функций является полином четвертой степени. Числитель передаточной функции по частоте тока статора и частоте вращения – полином третьей степени, а передаточной функции по напряжению – второй. Для частоты вращения вала как выходной координаты передаточные функции по напряжению и частоте тока статора имеют в числителе полином шестой и седьмой степеней соответственно, а в знаменателе – девятой степени. Линеаризация электропривода необходима для изучения динамических свойств АСРТ методами теории автоматического управления линейных систем.

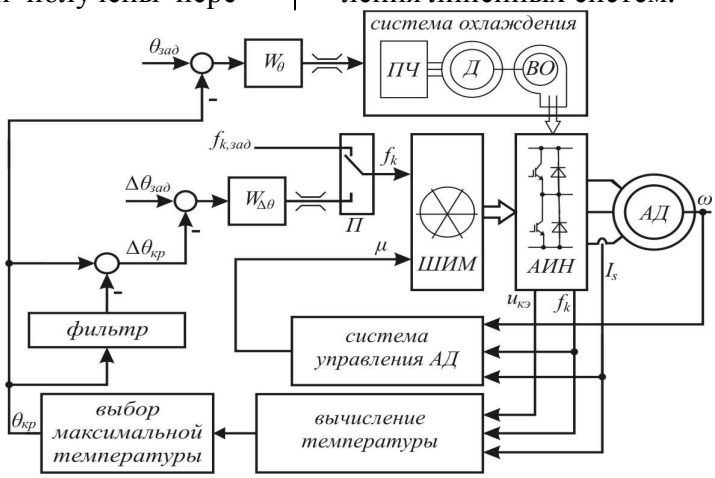

Рис. 4. Структурная схема комбинированной АСРТ:
АД и *Д* – тяговый и вспомогательный асинхронные двигатели;
АИН – автономный инвертор напряжения; *ШИМ* – широтно-импульсный модулятор; *П* – переключатель режимов работы; $f_{k,зад}$ – заданное значение частоты коммутации транзисторов; $\Delta\theta_{зад}$ – заданное значение колебания температуры кристалла полупроводника; *ПЧ* – преобразователь частоты; *ВО* – вентилятор охлаждения

Разработанная схема АСРТ приведена на рис. 4.

Устойчивость и качество работы системы регулирования зависят от значения такого ее статического параметра, как коэффициент передачи системы регулирования $k_{ср}$ (в разомкнутом состоянии), который равен произведению коэффициента передачи объекта регулирования $k_{ор}$ и коэффициента передачи регулятора по отклонению W_{θ}, то есть при постоянном значении W_{θ} коэффициент $k_{ср}$ будет изменяться пропорционально коэффициенту $k_{ор}$. Коэффициент $k_{ор}$ систем охлаждения как тепловых объектов регулирования увеличивается при уменьшении тепловой нагрузки, что приводит к увеличению коэффициента $k_{ср}$ и уменьшению устойчивости и качества работы, то есть к значительным колебаниям регулируемой величины. Для системы регулирования температуры тяговой полупроводниковой преобразовательной установки это означает, что при уменьшении тока нагрузки установки или температуры наружного охлаждающего воздуха будет увеличиваться $k_{ор}$, что приведет к увеличению коэффициента $k_{ср}$ и уменьшению устойчивости и качества работы системы, то есть к значительным колебаниям регулируемой температуры силовых полупроводниковых приборов.

Для уменьшения колебаний температуры авторами предложено регулирование частоты коммутации силовых ключей. Принцип работы в этом случае следующий. Если колебания температуры $\Delta\theta_{кр}$ не превышают их заданного значения $\Delta\theta_{зад}$, то переключатель *П* находится в верхнем положении и *АИН* работает с постоянной частотой коммутации f_k, определяемой заданием системы управления электропривода $f_{k,зад}$. Если значение $\Delta\theta_{кр}$ превышает $\Delta\theta_{зад}$, то переключатель *П* переходит в нижнее положение, подключая тем самым контур регулирования колебаний температуры. ПИД-регулятор $W_{\Delta\theta}$ позволяет непрерывно регулировать величину f_k. Непрерывное изменение f_k может вызвать сложности при технической реализации алгоритмов *ШИМ*, поэтому в качестве рекомендации при практическом использовании рассматриваемой системы можно предложить применение многопозиционного релейного регулятора колебаний температуры вместо ПИД-регулятора. Ограничение выходных величин частоты коммутации ПИД-регулятора необходимо осуществить по максимальному и минимальному значениям. Максимальное значение f_k ограничено прежде всего временем включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ силового ключа. Минимальное значение частоты коммутации должно соответствовать требованию удовлетворительного гармонического состава тока статора асинхронного двигателя, который, в свою очередь, влияет на нагрев обмоток статора и ротора и величину пульсаций момента [7]. Таким образом, если максимальное значение f_k является функцией самих полупроводников и мало зависит от вида нагрузки и ее характеристик, то минимальное значение f_k зависит прежде всего от свойств нагрузки. Для тягового преобразователя частоты минимальное значение частоты коммутации определяется тепловым состоянием тягового двигателя и его реализацией тяговой задачи. В результате расчетов и моделирования установлено, что с увеличением мощности двигателя и силовых ключей диапазон допустимых частот коммутации смещается в область меньших значений. Так, для двигателя мощностью 14 кВт диапазон допустимых частот составил 5...36 кГц, для двигателя мощностью 360 кВт – 2...17 кГц.

Результаты моделирования системы охлаждения как с линеаризованной, так и с нелинейной моделью электропривода вентилятора показали ее работоспособность и энергоэффективность при регулировании температуры преобразователя частоты в широком диапазоне температур полупроводников и охлаждающего воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев, И.Г. Расчеты нагрева и охлаждения полупроводниковых преобразовательных установок железнодорожного транспорта / И.Г. Киселев, А.Б. Буянов. – СПб.: ПГУПС-ЛИИЖТ, 2001. – 80 с.
2. On Line Thermal model and Thermal Management Strategy of a Three Phase Voltage Source Inverter / V. Blasko [et al.] // Industry Applications Conference. - 1999. – P. 1423 – 1431.
3. Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных

элементов / А.С. Космодамианский [и др.] // Электротехника. - 2014. - № 8. - С. 38 – 43.
4. Космодамианский, А.С. Применение тяговых электроприводов с двух- и трехуровневыми автономными инверторами напряжения / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Наука и техника транспорта. - 2013. - №1. – С. 74 – 83.
5. Пугачев, А.А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, А. С. Космодамианский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 55−61.
6. Пугачев, А.А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 3 (64). – С. 32 – 37.
7. Космодамианский, А.С. Экспериментальная установка для исследования и регулирования процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. - Новочеркасск, 2011. - № 2 (62). – С. 65 – 76.

1. Kiselyov, I.G. *Computations of Heating and Cooling of Semiconductor Converter Installations Railway Transport* / I.G. Kiselyov, A.B. Buyanov. – S-Pb.: PSUC-LIERT, 2001. – pp. 80.
2. On Line Thermal model and Thermal Management Strategy of a Three Phase Voltage Source Inverter / V. Blasko [et al.] // Industry Applications Conference. - 1999. – P. 1423 – 1431.
3. Control system of traction electro-drive with temperature control of heat-loaded elements / A.S. Kosmodamiansky [et al.] // *Electrical Engineering*. - 2014. - № 8. - pp. 38 – 43.
4. Kosmodamiansky, A.S. Application of traction electro-drives with two- and three-level autonomous invedrters of voltage / A.S. Kosmodamiansky, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // *Science and Engineering of Transport*. - 2013. - №1. – pp. 74 – 83.
5. Pugachev, A.A. Control system of traction asynchronous motor with minimization of power loss / A. A. Pugachev, V.I. Vorobiev, A. S. Kosmodamiansky // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – № 2 (46). – pp. 55−61.
6. Pugachev, A.A. Minimization of power loss in electro-drive with scalar system of asynchronous motor control / A. A. Pugachev // *Bulletin of Cherepovets State University*. – 2015. – № 3 (64). – pp. 32 – 37.
7. Kosmodamiansky, A.S. Experimental installation for investigation and control of heating and cooling processes in asynchronous motor / A.S. Kosmodamiansky, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // *Bulletin of All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Production*. - Novocherkassk, 2011. - № 2 (62). – pp. 65 – 76.

Статья поступила в редколлегию 26.09.2016.
Рецензент: к.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Хвостов В.А.

Сведения об авторах:

Воробьев Владимир Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.
Пугачев Александр Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.
Стрекалов Николай Николаевич, ст. преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения (РОАТ МИИТ), e-mail: strek79@list.ru.

Vorobiev Vladimir Ivanovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Rolling-Stock”, Bryansk State Technical University, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.
Pugachev Alexander Anatolievich, Can. Eng., Assistant Prof. “Electronic, Radio-electronic and Electrical Systems”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.
Strekalov Nikolay Nikolayevich, Senior lecturer of the Dep. “Traction Rolling-Stock”, Russian Open Academy of Transport of Moscow State University of Communications (ROAT MIET), e-mail: strek79@list.ru.