

## Minimization Electric Losses in Transistor DC Drives

Kovalov V.<sup>1</sup>, Kovalova Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine "Kharkiv Politechnical Institut"

<sup>2</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** This work is devoted to develop the algorithm for determining the optimal switching frequency of a transistor pulse-width converter (PWM) to minimize the total electric losses in a DC drive. Electric losses in the armature winding and in the PWM transistors are divided into two components: static, from the direct current component, and dynamic. The latter include losses in the armature winding from the harmonic components of the current and losses in transistors from transient switching currents. Since the dynamic losses in transistors increase with increasing frequency, and in the armature winding they decrease from current harmonics, there is an optimal switching frequency value at which the total dynamic losses in the PWM drive will be minimal. This aim is achieved by solving the problem of determining the analytical dependence of dynamic electric losses in the armature winding on the PWM switching frequency and computer simulation of a transistor DC drive. As a result of the research, an analytical expression was obtained for calculating the relative dynamic electric losses in the armature winding with polyharmonic power supply. An algorithm was proposed for determining the optimal switching frequency of the PWM: 1) on computer models of the DC motor and PWM, the dependences of dynamic electrical losses on the switching frequency were determined; 2) the graph was built showing the dependence of the total dynamic electric losses, on which the point was determined of minimum losses, which corresponds to the optimal value of the switching frequency. The novelty of the work was that the theory of electric losses in the armature windings with polyharmonic power was further developed.

**Keywords:** transistor electric drive, switching frequency of transistors, electrical losses, current ripple factor, computer models.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.04>

UDC: 621.333.26

### Minimizarea pierderilor electrice în convertizoarele de curent continuu cu tranzistori

Kovalev V.N.<sup>1</sup>, Kovaleva Iu.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitatea tehnică Națională "Institutul politehnic din Kharkiv"

<sup>2</sup> Universitatea Națională din Kharkiv de Economie Municipală A.N. Bechetov

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a dezvolta un algoritm pentru determinarea frecvenței optime de comutare a unui convertor de lățime a impulsului tranzistorului (PWM) pentru a minimiza pierderile electrice totale într-o unitate de curent continuu. Deoarece pierderile electrice dinamice în tranzistoare cresc odată cu creșterea frecvenței, iar în înfășurarea armăturii de la armonicile curenți ele scad, atunci există o valoare optimă pentru frecvența de comutare PWM, la care pierderile dinamice totale în acționarea electrică cu PWM vor fi minime. Acest obiectiv este atins prin rezolvarea problemei determinării dependenței pierderilor electrice dinamice în înfășurarea armăturii de frecvența de comutare PWM și simularea pe computer a unui antrenament electric tranzistor. Ca urmare, s-a obținut o expresie analitică pentru pierderile electrice dinamice relative în înfășurarea armăturii cu alimentare poliarmonică, care sunt direct proporționale cu pătratul coeficientului de ondulare curent. Se propune un algoritm pentru determinarea frecvenței optime de comutare a PWM, care este următorul: 1) pe modelele computerizate ale motorului și PWM se determină dependențele pierderilor electrice dinamice de frecvența de comutare; 2) construți un grafic al dependenței pierderilor electrice dinamice totale ale unui antrenament electric tranzistor de frecvență; pe care se determină punctul de pierderi minime și valoarea optimă a frecvenței de comutare. Semnificația lucrării constă în obținerea unei expresii analitice pentru pierderile electrice dinamice relative în înfășurările de armatură cu alimentare poliarmonică, în care pierderile din componentele armonice ale curentului sunt direct proporționale cu pătratul coeficientului de ondulare a curentului. Este dat un exemplu de utilizare practică a algoritmului propus pentru calcularea frecvenței optime a unui tranzistor de curent continuu.

**Cuvinte-cheie:** acționare electrică a tranzistorului, frecvența de comutare a tranzistorilor, pierderi electrice, factor de ondulare a curentului, simulare pe computer.

**Минимизация электрических потерь в транзисторных электроприводах постоянного тока  
Ковалев В.Н.<sup>1</sup>, Ковалева Ю.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова  
Харьков, Украина

**Аннотация.** Целью работы является разработка алгоритма для определения оптимальной частоты коммутации транзисторного широтно-импульсного преобразователя (ШИП) для минимизации общих электрических потерь в электроприводе постоянного тока. Электрические потери в обмотке якоря и в транзисторах ШИП разделены на две составляющие: статические от постоянной составляющей тока и динамические. К последним отнесены потери в обмотке якоря от гармонических составляющих тока и потери в транзисторах от переходных токов коммутации. Поскольку динамические электрические потери в транзисторах с ростом частоты возрастают, а в обмотке якоря от гармоник тока уменьшаются, то существует оптимальное значение частоты коммутации ШИП, при которой общие динамические потери в электроприводе с ШИП будут минимальными. Поставленная цель достигается решением задачи определения зависимости динамических электрических потерь в обмотке якоря от частоты коммутации ШИП и компьютерного моделирования транзисторного электропривода. В результате получено аналитическое выражение относительных динамических электрических потерь в обмотке якоря при полигармоническом питании, которые прямо пропорциональны квадрату коэффициента пульсаций тока. Предложен алгоритм для определения оптимальной частоты коммутации ШИП, который заключается в следующем: 1) на компьютерных моделях двигателя и ШИП определяют зависимости динамических электрических потерь от частоты коммутации; 2) строят график зависимости общих динамических электрических потерь транзисторного электропривода от частоты; на котором определяют точку минимума потерь и оптимального значения частоты коммутации. Новизна работы заключается в получении аналитического выражения относительных динамических электрических потерь в обмотках якоря при полигармоническом питании, в котором потери от гармонических составляющих тока прямо пропорциональны квадрату коэффициента пульсаций тока. Приведен пример практического использования предложенного алгоритма для расчета оптимальной частоты транзисторного электропривода постоянного тока.

**Ключевые слова:** транзисторный электропривод, частота коммутации транзисторов, электрические потери, коэффициент пульсаций тока, компьютерное моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области полупроводниковой силовой электроники сделали возможным использование регулируемых асинхронных электроприводов как альтернативу электроприводам постоянного тока.

Однако для тех механизмов, в которых главенствующим фактором является быстродействие, определяющее их производительность и эффективность, электроприводам постоянного тока альтернативы на сегодня пока нет. К таким механизмам относятся реверсивные прокатные станы, системы наведения ракетных комплексов и др.

Кроме этого, во многих странах до сих пор существует обширный парк подвижного состава электрического транспорта (трамваи, троллейбусы, метро, пригородные электропоезда, шахтные электровозы, складские грузоподъемники) с двигателями постоянного тока (ДПТ) последовательного возбуждения. При их капитальном ремонте целесообразно проводить модернизацию, то есть, заменять релейно-контакторные

системы управления ДПТ на широтно-импульсные преобразователи (ШИП), которые серийно выпускаются в мире. Однако для дальнейшего повышения общей энергоэффективности таких электроприводов за счет уменьшения электрических потерь возникает задача настройки оптимальной частоты коммутации ШИП с учетом параметров конкретного двигателя.

Существуют также и электромобили постоянного тока для повышения энергоэффективности которых используют режимы рекуперативного торможения [1,2].

Исходя из вышеизложенного, тема минимизации электрических потерь в силовой схеме транзисторного электропривода постоянного тока за счет установления оптимальной частоты коммутации транзисторов является актуальной.

Выходное напряжение ШИП имеет прямоугольную форму и представляется рядом Фурье, поэтому в дальнейшем используем термин «полигармоническое питание» обмотки якоря ДПТ.

Электрические потери в транзисторных электроприводах целесообразно разделить на статические потери и динамические потери. Статические потери создаются постоянной составляющей тока. Динамическими называем потери, которые создаются гармоническими составляющими тока в обмотках якоря и переходными токами включения и выключения транзисторов при их коммутации.

В первом приближении статические потери в транзисторах можно определить по формуле  $\Delta P_{от} = I_0^2 R_T$ , где  $I, R_T$  – постоянная составляющая тока и прямое сопротивление транзистора.

Динамические потери в транзисторах от переходных токов включения и выключения прямо пропорциональны частоте коммутации [3-5], то есть,  $\Delta P_{дт} = K_T \cdot f$ , где  $K_T$  – коэффициент пропорциональности для конкретной серии транзисторов.

Далее проводим анализ публикаций по электрическим потерям в обмотке якоря ДПТ при полигармоническом питании. В [6] предложена модель для расчета электрических потерь в ДПТ при полигармоническом питании с учетом нелинейного характера кривой намагничивания. Аналогичная модель рассмотрена в [7] для транзисторного электропривода троллейбуса с двигателями смешанного возбуждения. В [8,9] проведено моделирование магнитных потерь от высших гармоник. В [10] предложена тепловая карта нагрева тяговых электродвигателей постоянного тока при полигармоническом питании. В [11] произведена оценка электрических потерь при полигармоническом питании в зависимости от частоты коммутации и ширины импульсов транзисторного преобразователя. В [12] рассмотрена усовершенствованная модель электрических потерь тягового двигателя электровоза. В [13,14] рассмотрены зависимости коэффициента пульсаций напряжения от ширины импульсов питания двигателя. В [15] предлагается методика определения оптимальной частоты коммутации ШИП, которая имеет недостатки, исключающие ее практическое использование. В частности, методика требует расчета времени нарастания и спада фронтов тока.

Таким образом, в вышеприведенной литературе в основном рассматривается моделирование потерь и не предлагается практической методики для выбора оптимальной частоты коммутации транзисторов с целью уменьшения электрических, то есть, задача является актуальной.

Целью работы является разработка методики определения оптимальной частоты коммутации транзисторного широтно-импульсного преобразователя для минимизации динамических электрических потерь в электроприводе постоянного тока.

## I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В общем случае потери мощности в ДПТ делятся на механические, магнитные и электрические. Полигармоническое напряжение питания не влияет на механические потери. При полигармонических токах расчет магнитных потерь производят по упрощенной формуле, не предусматривающей разделения магнитных потерь на вихревые токи и гистерезис [16]

$$P_{\mu v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (1)$$

где  $P_{\mu v}$  – магнитные потери в стали от действия  $v$ -й гармоники тока;  $B_v$  –  $v$ -я гармоника магнитной индукции, которая уменьшается с ростом частоты,  $f_v$  – частота  $v$ -й гармоники;  $\beta = 1,3-1,5$  – показатель степени для конкретной марки стали, учитывающий соотношение потерь на вихревые токи и гистерезис на частоте 50 Гц. Результирующие магнитные потери определяются методом суммирования потерь от действия каждой гармоники. В первом приближении принимаем, что нагрев стали сердечника от магнитных потерь, вызванных гармониками магнитного потока не влияет на нагрев обмотки якоря.

Для анализа динамических электрических потерь в обмотке якоря от гармоник тока необходимо выбрать обобщенный параметр, который влияет на динамические электрические потери и не зависит от мощности двигателя. Таким обобщенным параметром целесообразно принять

коэффициент пульсаций тока, относительно которого существует три определения по ГОСТ 23875-88 и стандарту IEC-60050-161 Международной электротехнической комиссии. Коэффициент пульсаций: 1) отношение половины амплитуды пульсаций к постоянной составляющей; 2) отношение амплитуды пульсаций к постоянной составляющей; 3) отношение действующего значения переменной составляющей  $\sqrt{\sum I_k^2}$  к постоянной составляющей  $I_0$ . Для анализа влияния пульсаций тока на динамические электрические потери целесообразно использовать третье определение, то есть,

$$K_{PS} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0 . \quad (2)$$

Общие электрические потери в обмотке якоря от полигармонического тока якоря, равного  $I_A = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}$  разделяем на статические  $\Delta P_{0A} = I_0^2 R_A$  от постоянной составляющей тока и динамические  $\Delta P_{DA} = R_A \sum I_k^2$  от гармонических составляющих. Выразим действующее значение полигармонического тока через коэффициент пульсаций

$$I_A = I_0 \sqrt{1 + K_{PS}^2} . \quad (3)$$

Выразим общие электрические потери в обмотке якоря относительно статических потерь от постоянной составляющей тока

$$\Delta P_A^* = \frac{I_0^2 (1 + K_{PS}^2) R_A}{I_0^2 R_A} = 1 + K_{PS}^2 \quad (4)$$

Из (4) видно, что общие потери относительно статических увеличиваются на величину относительных динамических потерь численно равных квадрату коэффициента пульсаций тока  $\Delta P_{DA}^* = K_{PS}^2$ , а в именуемых единицах динамические электрические потери равны  $\Delta P_{DA} = K_{PS}^2 \Delta P_{0A}$ .

Коэффициент пульсаций тока зависит от параметров режима работы транзисторного электропривода: 1) коэффициент заполнения импульса  $\gamma = t_i / T_p$ , где  $t_i, T_p$  - длительность импульса и период коммутации; 2) момент нагрузки на валу - постоянная составляющая

тока и от технических параметров электропривода: 1) частота коммутации транзисторов; 2) индуктивность цепи якоря.

В процессе эксплуатации электропривода постоянная составляющая тока и коэффициент заполнения импульса тока изменяются случайным образом, для конкретизации исследования их целесообразно принять численно равными среднестатистическим значениям, то есть: относительный нагрузочный ток 0,6 от номинального, коэффициент заполнения импульса  $\gamma = 0,5$ . Поскольку динамические электрические потери в транзисторах возрастают с ростом частоты, а в обмотке якоря уменьшаются, то существует оптимальное значение частоты, при которой общие динамические электрические потери в транзисторном электроприводе будут минимальными.

Отсюда следует алгоритм определения оптимальной частоты коммутации транзисторов для минимизации общих динамических электрических потерь в транзисторном электроприводе: 1) на компьютерных моделях двигателя и ШИП определяют зависимости динамических электрических потерь от частоты коммутации; 2) строят график зависимости общих динамических электрических потерь транзисторного электропривода от частоты; на котором определяют точку минимума потерь и оптимального значения частоты коммутации.

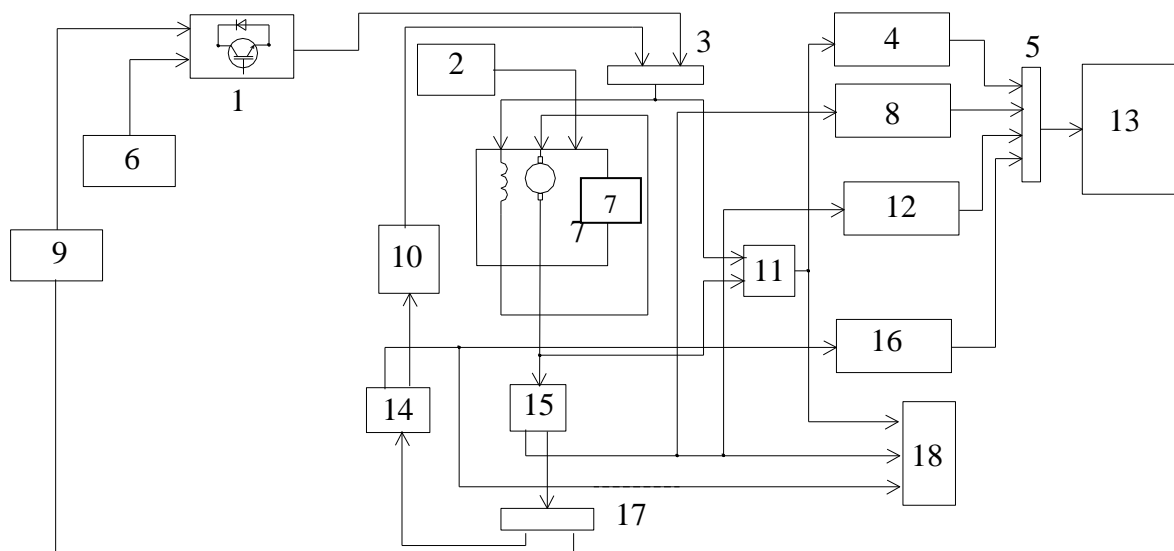
Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определить величину оптимальной частоты коммутации, при которой динамические электрические потери в транзисторном электроприводе будут минимальными.

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера использования предложенной методики определим оптимальную частоту для электропривода с двигателем последовательного возбуждения типа ДК-261А: мощность  $P=60$  кВт; напряжение якоря  $U=550$  В; частота вращения  $n=1460$  об/мин; номинальный ток якоря  $I=250$  А; сопротивление обмотки якоря  $0,0316$  Ом, индуктивность цепи якоря  $L_A=1,17$  мГн. Для получения зависимости коэффициента пульсаций тока от частоты для

последующего расчета динамических электрических потерь в обмотке якоря составлена компьютерная модель

транзисторного электропривода (рис. 1) в программном пакете Simulink [17].



**Рис. 1. Компьютерная модель транзисторного электропривода.**

- 1- ШИМ (PWM); 2 – нагрузка двигателя (motor load); 3,5 – демультиплексор (demultiplexor); 4 - блок расчета действующего значения напряжения (unit for calculating the effective value of voltage); 6 – блок управления (control bloc); 7 – двигатель (motor); 8 - блок расчета действующего значения тока (effective current value calculation unit); 9 - блок источника напряжения (voltage source); 10- обратный диод (flyback diode); 11 – вольтметр (voltmeter); 12- расчета постоянной составляющей тока (calculation of the DC component of the current); 13 – дисплей (monitor); 14 – измеритель тока обратного диода (flyback diode current meter); 15 - измеритель тока якоря (motor armature current); 16 - расчет действующего значения тока (calculation of the effective value of the current); 17 – мультиплексор (multiplexor); 18- осциллограф (oscilloscope).

**Fig. 1. Computer model transistor DC electric drive.**

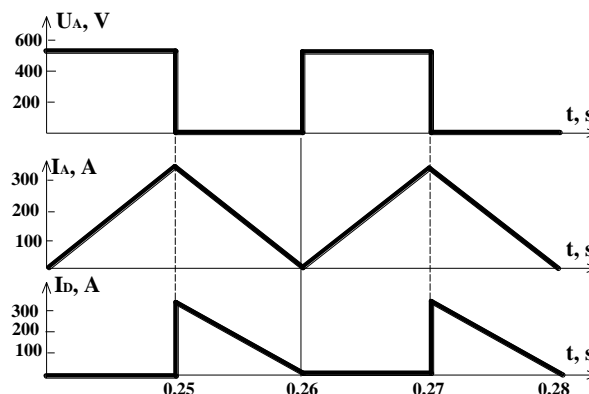
Компьютерный эксперимент проводится следующим образом.

Для диапазона частот 100-1100 Гц измеряются действующие значения тока  $I_A$ , и постоянные составляющие  $I_0$ . Коэффициент пульсаций тока якоря определяется по формуле

$$K_{PS} = \sqrt{I_A^2 - I_0^2} / I_0. \quad (5)$$

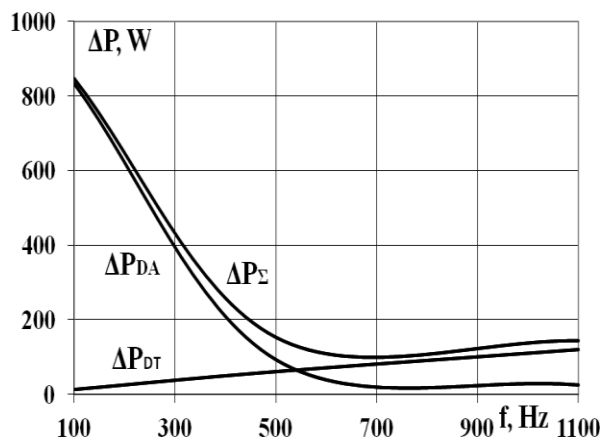
На рис. 2 показаны компьютерные осциллограммы установившегося режима работы двигателя после окончания переходного процесса пуска двигателя с выходом на установившуюся скорость.

Результаты компьютерных расчетов показали, что графики зависимостей коэффициента пульсаций тока от частоты и электромагнитной постоянной времени якоря имеют практически линейный характер.



**Рис. 2. Осциллограммы: напряжение якоря  $U_A$ , ток якоря  $I_A$ , ток обратного диода  $I_D$ .  
Fig. 2. Oscillograms: armature voltage  $U_A$ , armature current  $I_A$ , back diode current  $I_D$ .**

Далее определяем динамические потери в обмотке якоря по формуле  $\Delta P_{DA} = K_{PS}^2 \Delta P_{0A}$  и строим график зависимости динамических потерь в обмотке якоря от частоты, показанных на рис.3.



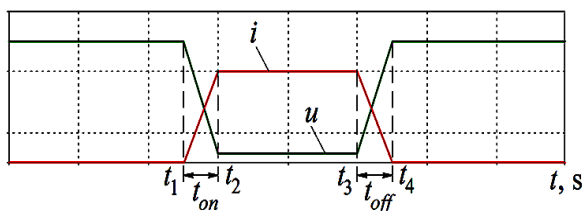
**Рис. 3. Графики зависимости динамических электрических потерь от частоты.**  
**Fig. 3. Graphs of dynamic electrical losses on frequency.**

Анализ зависимости потерь мощности в силовых транзисторных модулях транзисторах в зависимости от частоты коммутации рассмотрен в [5], которые состоят из потерь мощности в самих транзисторах и потерь мощности в обратных диодах

$$\Delta P_{\text{mod}} = \Delta P_{VT} + \Delta P_{VD}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\text{mod}}$  – потери мощности в силовых транзисторных модулях,  $\Delta P_{VT}$  – потери мощности в самих транзисторах,  $\Delta P_{VD}$  – потери мощности в обратных диодах.

Примерный процесс коммутации тока и напряжения в силовых транзисторах представлен на рис. 4



**Рис. 4. Переходный процесс тока и напряжения при коммутации.**  
**Fig. 4. Transient processes of current and voltage during switching.**

При этом потери мощности условно делят на статические потери мощности в проводящем состоянии и динамические

потери мощности при включении и выключении транзистора

$$\Delta P_{VT} = \Delta P_{OT} + \Delta P_{DT}, \quad (7)$$

где  $\Delta P_{OT}$  — мощность статических потерь в транзисторах;  $\Delta P_{DT}$  — мощность динамических потерь в транзисторах.

Мощность статических потерь в транзисторах можно определить как интеграл произведения мгновенных значений напряжения и тока коллектора из выражения

$$\Delta P_{OT} = \int_{t_2}^{t_3} (i_k \cdot u_k) dt, \quad (8)$$

где  $i_k, u_k$  – ток и напряжение коллектора;  $t_2, t_3$  — интервалы проводимости транзистора согласно рис. 4.

Изменение частоты переключения практически не влияет на статические потери В первом приближении статические потери в транзисторах можно также определить по формуле

$$\Delta P_{OT} = I_0^2 R_T, \quad (9)$$

где  $I, R_T$  – постоянная составляющая тока и прямое сопротивление транзистора.

Динамические потери можно определить как интеграл мощности на интервалах включения и выключения транзистора

$$\Delta P_{DT} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{on} \cdot u_{on}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{of} \cdot u_{of}) dt, \quad (10)$$

где  $u_{on}, i_{on}$  – мгновенные напряжение и ток коллектора при включении транзистора,  $t_1, t_2$  – интервал включения транзистора согласно рис.4,  $i_{of}, u_{of}$  – мгновенные напряжение и ток коллектора при выключении транзистора,  $t_3, t_4$  – интервал выключения транзистора согласно рис.4.

Мощность статических потерь в обратных диодах можно определить, как интеграл произведения мгновенных значений напряжения и тока из выражения

$$\Delta P_{0D} = \int_{t_1}^{t_2} (i_D \cdot u_D) dt, \quad (11)$$

где  $i_D, u_D$  – ток и напряжение обратного диода;  $t_2, t_3$  – интервалы проводимости обратного диода согласно рис. 4.

Динамические потери в обратных диодах определяются из выражения

$$\Delta P_{DD} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{on} \cdot u_{on}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{of} \cdot u_{of}) dt, \quad (10)$$

где  $u_{on}, i_{on}$  – мгновенные напряжение и ток диода при включении,  $t_1, t_2$  – интервал включения диода,  $i_{of}, u_{of}$  – мгновенные напряжение и ток диода при выключении,  $t_3, t_4$  – интервал выключения диода.

Определение потерь мощности в силовых транзисторах можно определить расчетом в специализированных программы от производителей силовых транзисторов.

В [5] с использованием специализированного программного обеспечения SemiSel, разработанного предприятием-производителем транзисторов проведен расчет статических и динамических потерь для IGBT-транзистора типа SKM300GAR123D (производство фирмы SEMIKRON: ток коллектора 300 А, напряжение 1200 В, прямое сопротивление коллектор-эмиттер 4,7 мОм при 125°C, напряжение насыщения 2,8 В). По результатам расчетов, полученных в [5] аппроксимируем график относительных динамических потерь транзистора формулой

$$\Delta P_{DT}^* = \Delta P_{DT} / \Delta P_{OT} = K_{DT} f, \quad (12)$$

где  $K_{DT}$  – коэффициент пропорциональности, полученный из графика динамических потерь в транзисторе и равный  $K_{DT} = 0,064$  Вт·Гц.

Общий график  $\Delta P_{\Sigma}^*$  зависимости суммы динамических электрических потерь в транзисторе и в обмотке якоря показан на рис. 3.

Из графика следует, что оптимальной является частота 750 Гц, поскольку общие электрические динамические потери при этом минимальны.

### III Выводы

Разработан алгоритм определения оптимальной частоты коммутации транзисторов для минимизации общих динамических электрических потерь в транзисторном электроприводе постоянного тока, который заключается в следующем: 1) на компьютерных моделях двигателя постоянного тока и широтно-импульсного преобразователя определяют зависимости динамических электрических потерь от частоты коммутации; 2) строят график зависимости общих динамических электрических потерь транзисторного электропривода от частоты; на котором определяют точку минимума потерь и оптимального значения частоты коммутации. Научная значимость результатов работы заключается в получении аналитического выражения для расчета относительных динамических электрических потерь в обмотке якоря при полигармоническом питании, которые прямо пропорциональны квадрату пульсаций тока якоря.

Практическая значимость результатов работы заключается в экономии электроэнергии при эксплуатации транзисторного электропривода путем определения оптимальной частоты коммутации.

### Литература (References)

- [1] Klepikov V.B., Gonchar A.C. Recupeativnyie regimy v electromobilah s supercondensatorom [Regenerative modes of the electric drive of an electric vehicle with supercapacitors. Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive]. Theory and practice. – 2012. No. 3/2012 (19), pp. 216-218. (In Russian).
- [2] Klepikov V.B., Semikov A.V. Energoefektivnost recuperativnih rezimov elektromobila. [Energy efficiency of electric vehicle regenerative mode] // Technical Electrodynamics. – 2017. – №6. – p. 36–42. (In Russian).
- [3] Zhemerov G. G., Ivakhno V. V., Koval’chuk O. I. Raschot moshnosti poter i temperatury tranzistornyh moduley pri computernom modelirovanii preobrazovateley [Calculation of the power loss and temperature of the structure of transistor-diode modules in computer simulation convrtters.. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 4, pp. 21-29. (In Russian).
- [4] Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordienko D. A., Khoruzhevskiy H. A. (2020).



- Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №2, pp. 82-88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/082>
- [5] Nerubatskyi V. P. Plakhtii O. A. Tugay D. V.. Hordiienko D. A. (2021). Method for optimization frequency in frequency convertor. *Nakoviy visnik natsionalnogo girnichogo universitetu*, №1. pp. 103-111. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>
- [6] Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Saprionova S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 11-17. doi: [10.20998/2074-272X.2021.6.02](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02)
- [7] Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaيدا V., Kuravskyi M., Petrenko O. Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 3, no. 9 (105), pp. 46-54. doi: [10.15587/1729-4061.2020.205288](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288).
- [8] Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*, 2020, vol.11, no 1, p. 24. doi: [10.3390/wevj11010024](https://doi.org/10.3390/wevj11010024).
- [9] Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 994 – 997. doi: [10.1109/TMAG.2010.2089501](https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2089501)
- [10] Edison Gundabattini, Arkadiusz Mystkowski, Adam Idzkowski, Raja Singh R. and Darius Gnanaraj Solomon Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods - A Review. *Energies* 2021, no14, 1472. doi: [10.3390/en14051472](https://doi.org/10.3390/en14051472).
- [11] Yeongsu Bak, Kyo-Beum Lee. Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron (THE KOREAN INSTITUTE POWER ELECTRONICS)*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1325-1335.
- [12] Goolak S., Saprionova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, no. 5 (108), pp. 38-46. doi: [10.15587/1729-4061.2020.218542](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542).
- [13] Lingxiao Xue, Guj-Jia Su, Burak Ozpineci. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization Modulation Scheme for a High Power Density Converter. *IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC)*. District of Columbia (USA), 2021, pp. 186-191.
- [14] Tcarafidy Raminosa, Randy Willis, Kevin Bannion. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Detroit, Michigan (USA), 2020, pp. 61-67.
- [15] Glazenko T.A. Полупроводниковие преобразователи в электроприводах постыаного тока [Semiconductor converters in direct current electric drives]. - L.: Energy, 1973.-304.p. (In Russian).
- [16] Petrenko A.N., Tanyansky V.I., Petrenko N.Ya. Additional power losses from higher harmonics of a frequency-controlled induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2012, no. 5, pp. 34-35.
- [17] German-Galkin S.G. *Comp'yuternoye modelirovaniye poluprovodnikovikh system v MATLAB 6.0* [Computer model of the semiconductor systems in MATLAB 6.0]. S. Petersburg: CORONA. 2007. 320 p.

#### Сведения об авторах.



**Ковалев Виктор Николаевич**, к.т.н., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Область научных интересов – энергетика электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.  
E-mail: [kovalov1952@gmail.com](mailto:kovalov1952@gmail.com)



**Ковалева Юлия Викторовна**, к.т.н., Харьковский национальный университет городского хозяйства. Область научных интересов – электромагнитная совместимость электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.  
E-mail: [kovalova.jv@gmail.com](mailto:kovalova.jv@gmail.com)