

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.316.71

Коцур М. И.¹, Коцур И. М.², Андриенко А. А.³, Андриенко Д. С.⁴

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Доцент, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

³Аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

⁴Аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ КОММУТАЦИИ ВЕНТИЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ЧАСТОТНО-ТОКОВОГО АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

В статье рассматривается вопрос повышения энергоэффективности систем электропривода путем определения оптимального значения регулировочного параметра преобразователя, обеспечивающего максимальный коэффициент полезного действия системы электропривода на примере частотно-токового асинхронно-вентильного каскада. Цель работы заключается в разработке простой в реализации методики определения оптимальной частоты коммутации силовых ключей преобразователя в виде аналитических выражений при которой выполняется условие минимизации потерь в электроприводе. Объектом исследования являются электромагнитные процессы преобразования энергии в системе двигатель-преобразователь. Предметом исследования является электропривод по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада. Приведена методика расчета потерь как в двигателе, так и в силовых элементах преобразователя. Определена целевая функция суммарных потерь в электроприводе в зависимости от частоты коммутации силовых ключей и коэффициентов гармонических искажений токов статора и ротора асинхронного двигателя. Целевая функция суммарных потерь в электроприводе преобразована к однокритериальной зависимости (частоты коммутации силовых ключей преобразователя). С помощью имитационного моделирования выполнен расчет потерь в электроприводе, с учетом особенностей электромагнитных и энергетических процессов для данного класса электропривода, который подтвердил адекватность предложенного упрощенного способа определения оптимальной частоты коммутации силовых ключей в преобразователе. Предложена методика определения оптимальной частоты коммутации силового ключа, которая может быть применена при наладочных работах преобразователей, инженерном проектировании электропривода различных классов и режимов работы.

Ключевые слова: частота коммутации, оптимизация, потери, энергоэффективность, преобразователь, двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Проветривание шахт вентиляторами главного проветривания (ВГП) – наиболее энергоемкий технологический процесс. Практически на всех шахтах для ВГП применяют системы нерегулируемого электропривода [1]. С целью повышения экономичности значительного количества ВГП возможен переход на более низкую частоту вращения ротора двигателя за счет применения энергоэффективных систем регулирования электропривода, таких как преобразователи частоты (ПЧ), индукторно-емкостные преобразователи (ИЕП) и преобразователи по схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК). С помощью этих систем можно независимо регулировать скорость и момент электродвигателя (асинхронного или синхронного) [2–4]. Однако ПЧ и ИЕП имеют большую установленную мощность, которая соизмерима с мощностью двигателя ВГП. Кроме того, применение ПЧ и ИЕП ограничено в использовании в высоковольтном электроприводе ВГП классом напряжения полупровод-

никовых элементов преобразователя. Поэтому в таких электроприводах возможным остается регулирование скорости на роторной стороне двигателя, где напряжение ротора значительно ниже чем напряжение статора. Для этого может быть применен частотно-токовый асинхронно-вентильный каскад (ЧТАВК), обладающий высокой энергоэффективностью при регулировании в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора. Однако для такой системы электропривода не был исследован вопрос определения оптимальной частоты коммутации силовых ключей, при которой обеспечивается минимальный уровень выделяемых потерь в системе двигатель-преобразователь.

Следовательно, существует необходимость в определении оптимальной частоты коммутации силовых ключей данного класса системы электропривода.

Целью данной работы является определение оптимальной частоты коммутации, при которой обеспечивается минимизация суммарных потерь в системе электропривода.

Для определения оптимальной частоты коммутации силовых ключей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада целесообразно оценить величину потерь в АД и коммутационные потери в ключах преобразователя.

Общие потери в АД, согласно [3] можно определить с помощью выражения:

$$\Delta P = \frac{P_H \cdot (1 - \eta)}{\eta}, \quad (1)$$

где – P_H номинальная мощность АД; η – коэффициент полезного действия АД.

Постоянные потери, с учетом наличия высших гармоник токов статора и ротора с достаточной точностью можно определить из следующего соотношения [2]:

$$P_{\text{пост}} = \lambda_I \cdot \Delta P - M_H \cdot \omega \cdot s_H \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right), \quad (2)$$

$$\lambda_I = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}, \quad (3)$$

где λ_I – коэффициент искажения тока; s_H – номинальное скольжение ротора АД; M_H – номинальный момент АД; I_{rk} – амплитуда k -й гармоники тока.

Переменные потери в обмотках статора и ротора АД определяются согласно выражения [7]:

$$P_{\text{эл}} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{I_s}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{I_r}^2 \cdot r_2 \quad (4)$$

Добавочные и вентиляционные потери в высоковольтных АД не превышают 2% [3,7] и поэтому ими можно пренебречь.

Таким образом целевая функция суммарных потерь в АД в зависимости от коэффициента искажения тока имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{дв}}(\lambda_{I_s}, \lambda_{I_r}) = & 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{I_s}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{I_r}^2 \cdot r_2 + \\ & + \lambda_{I_s} \cdot \Delta P - M_H \cdot \omega \cdot s_H \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим потери, возникающие в цепи постоянного тока ЧТАВК при периодических коммутациях вентилей, а именно в силовом ключе, отсекающем диоде, а также в выпрямительно – инверторных группах.

Суммарные потери в силовом транзисторе имеют несколько составляющих:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{осн}} + P_{\text{вкл}} + P_{\text{выкл}} + P_{\text{ут}} + P_{\text{уэ}}, \quad (6)$$

где: $P_{\text{осн}}$ – основные потери, создаваемые током коллектора во включённом состоянии транзистора; $P_{\text{вкл}}$ – потери при включении транзистора; $P_{\text{выкл}}$ – потери при выключении транзистора; $P_{\text{ут}}$ – потери от токов утечки; $P_{\text{уэ}}$ – потери в цепи управления.

В большинстве случаев, потерями от токов утечки и потерями в цепи управления можно пренебречь.

Расчет потерь транзистора типа IGBT во включенном состоянии аналогичен расчету для тиристора (вольт – амперные характеристики приборов, во включенном состоянии, подобны) [8]:

$$P_{\text{осн}} = U_o \cdot I_a \left(1 + k_{\Phi}^2 \frac{I_a R_d}{U_o}\right), \quad (7)$$

где U_o , R_d – пороговое напряжение и динамическое сопротивление, соответственно; $I_a = I_{\text{ксп}}$ – среднее значение коллекторного тока силового ключа; k_{Φ} – коэффициент формы коллекторного тока.

Параметры вольтамперной характеристики IGBT во включенном состоянии можно определить по соответствующим характеристикам, приведенных в паспортных данных IGBT [9].

Среднее значение коллекторного тока $I_{\text{ксп}}$ определяется соотношением:

$$I_{\text{ксп}} = I_{\text{вх}} \cdot \gamma, \quad (8)$$

где $I_{\text{вх}}$ – среднее значение входного тока ЧТАВК; $\gamma = \frac{t_i}{T}$ – коэффициент заполнения, равный отношению длительности включенного состояния транзистора к периоду повторяемости.

Уравнение (8) справедливо при условии $0 \leq t \leq t_{\text{cn}}$ полагая, что начало отсчёта времени, совпадает с началом спада коллекторного напряжения

Поскольку входной ток ЧТАВК может иметь значительные пульсации, то кривые коллекторного тока транзистора и анодного тока диода могут иметь достаточно сложную форму.

Для нахождения действующего значения тока коллектора можно сделать допущение о линейном законе изменения тока и напряжения коллектора на интервале включенного состояния силового ключа [8]:

$$i_k = \frac{U_{k \text{ max}}}{2 \cdot L_1} \cdot \frac{t^2}{t_r} = \frac{U_{\text{вых}}}{2 \cdot L_1} \cdot t_{\text{cn}} \cdot \frac{t^2}{t_r^2}, \quad (9)$$

$$u_k = U_{k \text{ max}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{cn}}}\right) \approx U_{\text{вых}} \left(1 - \frac{t}{t_r}\right), \quad (10)$$

где u_k, i_k – мгновенные значения коллекторного напряжения и тока; $U_{k \max} = U_{\text{вых}}$ – напряжение на коллекторе перед включением; $t_{cn} = t_r$ – длительность спада коллекторного напряжения, приблизительно, равная длительности нарастания коллекторного тока при включении транзистора.

Значение тока коллектора при включении транзистора (9) определяется его величиной в момент спада напряжения между коллектором и эмиттером до нуля.

Величина потерь при включении транзистора [8]:

$$P_{\text{вкл}} = \frac{1}{12} U_{\text{вых}} I_{\text{вх}} \frac{t_r}{T} = \frac{1}{12} U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot t_r \cdot f_k \quad (11)$$

Потери при выключении транзистора [8]:

$$P_{\text{выкл}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} u_k i_k dt = \frac{1}{12} U_{\text{вых}} I_{\text{вх}} \frac{t_f}{T} = \frac{1}{12} U_{\text{вых}} I_{\text{вх}} \cdot t_f \cdot f_k \quad (12)$$

Потери в диоде от обратного тока VD, согласно [8], имеют тоже несколько составляющих, наиболее существенными из которых являются потери от прямого тока (основные) и потери при выключении диода. Потери от прямого тока можно вычислить с помощью выражения (7).

Согласно [8, 10] мощность потерь при выключении диода:

$$P_{\text{вык}} = \frac{I_{bm} \cdot U_{bm} \cdot \tau}{T_k} = \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau f_k, \quad (13)$$

где I_{bm}, U_{bm} – амплитуды обратного тока и напряжения, соответственно; T_k – период частоты коммутации; f_k – частота коммутации; τ – длительность спада обратного тока диода, величина которого определяется из [8].

Таким образом, суммарные потери в ограничительном диоде:

$$P_{vd} = U_o \cdot I_d \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_d R_d}{U_o} \right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left(\frac{\tau_{ib}^2}{\tau_{ib} + \tau_{ub}} \right) + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k \quad (14)$$

Потери в выпрямительно – инверторной группе могут быть достаточно точно определены, как и в силовом транзисторе (диоде), с помощью выражения (6). Также, как и в случае транзистора, потерями от токов утечки и потерями в цепи управления можно пренебречь. В данном случае можно пренебречь также и потерями при включении и выключении тиристора (диода). Таким образом, суммарные потери в тиристорном выпрямителе будут соответствовать основным потерям:

$$P_T = P_{\text{осн}} = U_o I_{\text{ср}} \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_{\text{ср}} R_d}{U_o} \right), \quad (15)$$

где U_o, R_d – пороговое напряжение и динамическое сопротивление тиристора (диода), соответственно; $I_{\text{ср}}$ – среднее значение анодного тока тиристора (диода); k_{ϕ} – коэффициент формы тока тиристора (диода).

Среднее значение анодного тока тиристора для трехфазной мостовой схемы:

$$I_{\text{ср}} = I_d / 3, \quad (16)$$

Суммарные потери выпрямителя будут определяться количеством вентильных плеч n в схеме:

$$P_{\text{выпр}} = n \cdot P_{\text{осн}}. \quad (17)$$

Для трехфазной мостовой схемы $n = 6$.

Согласно уравнений (6), (14) и (21) можно окончательно записать целевую функцию потерь от частоты коммутации всех потерь в ЧТАВК в следующем виде:

$$P_{\Sigma \text{ ИП}}(f_k) = U_o \cdot I_a \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_a R_d}{U_o} \right) + \frac{1}{12} U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot t_r \cdot f_k + \frac{1}{12} U_{\text{вых}} I_{\text{вх}} \cdot t_f \cdot f_k + U_o \cdot I_d \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_d R_d}{U_o} \right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left(\frac{\tau_{ib}}{2} \right) + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k + 6 \cdot U_o I_{\text{ср}} \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_{\text{ср}} R_d}{U_o} \right) + 6 \cdot U_o I_{\text{inv}} \left(1 + k_{\phi}^2 \frac{I_{\text{inv}} R_d}{U_o} \right). \quad (18)$$

Используя выражения (5) и (17) можно получить общую функцию потерь в электроприводе:

$$P_{\Sigma}(f_k, \lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) = P_{\Sigma \text{ ИП}}(f_k) + P_{\partial \sigma}(\lambda_{Is}, \lambda_{Ir}). \quad (19)$$

Из (19) следует, что для определения оптимальной частоты коммутации силового ключа необходимо решать задачу безусловной оптимизации для трех переменных: коэффициентов искажения токов статора λ_{Is} , ротора λ_{Ir} и частоты коммутации ключа f_k . Решение задачи довольно сложное и громоздкое и при этом требуется определение самих коэффициентов λ_{Is} и ротора λ_{Ir} , зависящих от частоты коммутации ключа. Поэтому целесообразно преобразовать целевую функцию к зависимости от одной переменной, т.е. от f_k .

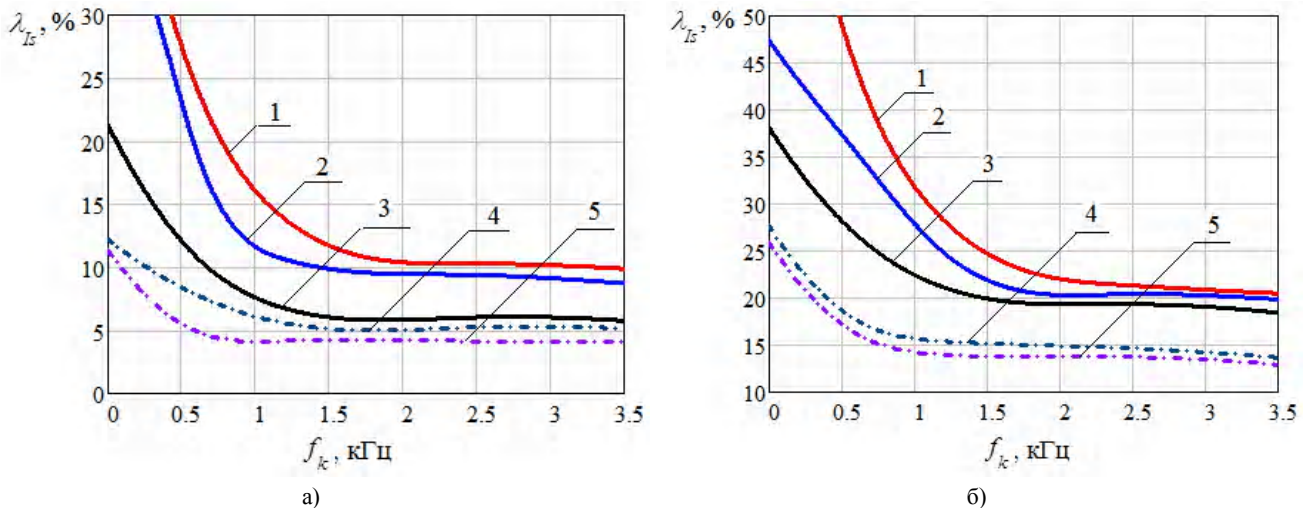


Рисунок 1 – Зависимости коэффициентов гармонических искажений тока статора (а) и ротора (б) АД типа АК-4 мощностью 1000 кВт от частоты коммутации силового ключа преобразователя
 1 – $s = 0,5$; 2 – $s = 0,4$; 3 – $s = 0,3$; 4 – $s = 0,2$; 5 – $s = 0,1$.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов гармонических искажений для тока статора и ротора АД типа АК-4 мощностью 1000 кВт от частоты коммутации силового ключа преобразователя, полученные с помощью имитационного моделирования при работе электропривода с вентиляторной нагрузкой в диапазоне рабочих скольжений $s = 0,5 \div 0,1$. При моделировании и расчете всех потерь в преобразователе были использованы силовые элементы для мостового выпрямителя диоды серии W1074Y#320, диод от обратного тока серии M0768S/RX250, силовой ключ IGBT транзистор серии T0850VB25E и тиристоры инверторной группы серии N0606YS250 фирмы производителя Westcode, паспортные данные которых приведены в [9]. Определить коэффициенты гармонических искажений также можно на практике в процессе настройки преобразователя, используя современные измерительные приборы, которые могут выполнять спектральный анализ токов и напряжений, и самостоятельно рассчитывать коэффициент гармонических искажений.

Для приведения целевой функции (19) от одной переменной (f_k) была выполнена аппроксимация зависимости коэффициента гармонических искажений тока статора и ротора АД от частоты коммутации силовых ключей преобразователя (рис. 1) для рабочего скольжения $s = 0,5$.

Соотношение, полученное в результате аппроксимации зависимости коэффициента гармонических искажений от частоты коммутации для тока статора АД, имеет вид:

$$\lambda_{I_s}(f_k) = 0,529 - 0,701 \cdot f_k + 0,445 \cdot f_k^2 - 0,126 \cdot f_k^3 + 0,013 \cdot f_k^4. \quad (20)$$

Соотношение, полученное в результате аппроксимации зависимости коэффициента гармонических искажений от частоты коммутации для тока ротора АД:

$$\lambda_{I_r}(f_k) = 0,857 - 0,999 \cdot f_k + 0,614 \cdot f_k^2 - 0,172 \cdot f_k^3 + 0,018 \cdot f_k^4. \quad (21)$$

Зависимость (19) с учетом (20) и (21) можно привести к однопараметрическому виду. Для определения оптимальной частоты коммутации силового ключа, при которой выполняется минимизация потерь в электроприводе, необходимо выполнение условия:

$$\frac{d}{df_k} P_{\Sigma}(f_k) = 0.$$

После несложных математических преобразований целевую функцию можно свести к зависимости от одной переменной $P_{\Sigma}(f_k)$:

$$\begin{aligned} & \left(1,35 \cdot 10^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^7 - \\ & - \left(22,94 \cdot 10^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 43,34 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^6 + \\ & + \left(0,165 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 0,31 \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^5 - \left(0,652 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + \right. \\ & \quad \left. + 1,236 \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^4 + \\ & + \left(1,554 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 3,006 \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^3 - \\ & - \left(2,271 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,565 \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k^2 + \\ & + \left(1,924 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,101 \cdot I_r^2 \cdot r_2 \right) \cdot f_k - \left(0,742 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + \right. \end{aligned}$$

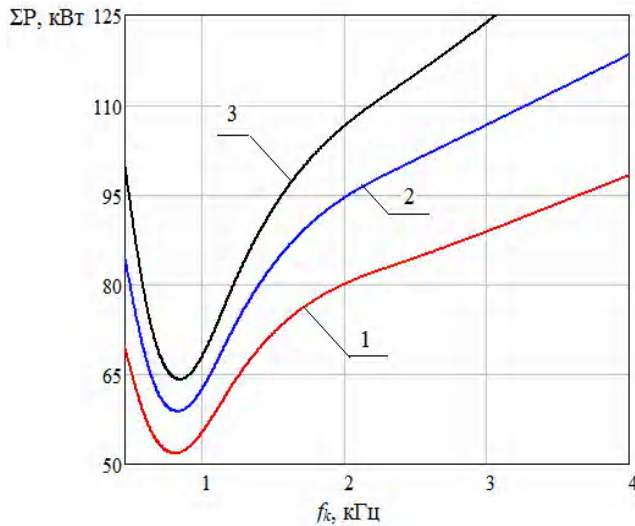


Рисунок 2 – Расчетные зависимости общих потерь в преобразователе от частоты коммутации силовых ключей для рабочего скольжения АД $S = 0,5$

1 – при $P_N = 630$ кВт; 2 – при $P_N = 800$ кВт; 3 – при $P_N = 1000$ кВт.

$$+1,712 \cdot I_r^2 \cdot r_2) + \Delta P + \frac{1}{12} U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{ВХ}} \cdot t_r + \frac{1}{12} U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВХ}} \cdot t_f + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} = 0. \quad (22)$$

Выражение (22) не трудно решить с помощью стандартных математических пакетов.

Для АД типа АК-4 с номинальной мощностью 630 кВт, работающего с вентиляторным характером нагрузки на рабочем скольжения $S = 0,5$, имеет мощность на валу $P_s = 0,5 = 204$ кВт, ток статора $I_{s_s} = 0,5 = 118$ А; сопротивление обмотки статора $r_1 = 0,295$ Ом; ток ротора $I_r = 192$ А; сопротивление обмотки ротора $r_2 = 0,028$ Ом, согласно (22) получено оптимальное значение частоты коммутации силового ключа при условии минимизации потерь в электроприводе

$$f_k^{\text{ОПТ}} = 0,626 \text{ кГц.}$$

Таким образом полученное аналитическое выражение (22) может быть использовано при определении оптимальной частоты коммутации силовых ключей, при которой обеспечивается минимальный уровень выделяемых потерь в электроприводе. Для расчета эффективной частоты коммутации силовых ключей при других значениях рабочего скольжения и других мощностей АД необходимо приводить аппроксимирующие выражения (20) и (21) для собственных значений коэффициентов гармонических искажений токов статора и ротора АД.

Для подтверждения адекватности приведенного метода определения эффективной частоты коммутации вентилей преобразователя, для системы частотно-токо-

вого асинхронно-вентильного каскада была разработана имитационная модель, в которую включен блок электромагнитной подмодели с учетом уточнённых параметров АД [11], и блока расчета энергетических показателей электропривода.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости суммарных потерь в электроприводе от частоты коммутации ключей преобразователя, соответственно для АД типа АК-4 номинальной мощностью $P_N = 630$ кВт, $P_N = 800$ кВт, $P_N = 1000$ кВт при рабочем скольжении $s = 0,5$, полученные с помощью имитационного моделирования.

Анализ полученных результатов расчета (рис. 2) показал, что минимизация общих потерь в приводе ЧТАВК выполняется при частотах коммутации для АД: $P_N = 630$ кВт – $f_k = 0,643$ кГц; для $P_N = 800$ кВт – $f_k = 0,698$ кГц; для $P_N = 1000$ кВт – $f_k = 0,704$ кГц.

Таким образом оптимальное значение частоты коммутации, что для АД с разными номинальными мощностями в системе ЧТАВК практически не меняется.

Сравнение расчетных результатов (на примере АД с $P_N = 630$ кВт) полученных по упрощенной методике ($f_k = 0,626$ кГц) с результатами имитационного моделирования ($f_k = 0,643$ кГц) показало, что расхождение не превысило 2,6%. Это свидетельствует об адекватности предложенного упрощенного способа определения оптимальной частоты коммутации силовых ключей в преобразователе.

Полученное аналитическое выражение (22) имеет приемлемую погрешность при определении оптимальной частоты коммутации силовых ключей, при которой обеспечивается минимальный уровень выделяемых потерь в электроприводе. Однако предложенный метод требует определения коэффициентов гармонических искажений для токов статора и ротора АД, значения которых зависят как от его рабочего скольжения, так и от режима работы электропривода. Поэтому для каждого случая необходимо приводить аппроксимирующие выражения (20) и (21) для собственных значений коэффициентов гармонических искажений токов статора и ротора АД.

ВЫВОДЫ

Проведены исследования коммутационных процессов в силовых элементах на примере преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада. Получены более точные выражения, позволяющие оценить основные и коммутационные потери в силовых элементах преобразователя.

Предложена методика определения оптимальной частоты коммутации силового ключа на примере преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада. Погрешность расчета оптимальной частоты коммутации силовых ключей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада, которая получена аналитическим способом по сравнению с результатами, полученными с помощью

имитационного моделювання, не перевищує 2,6%.

Предложена методика определения оптимальной частоты коммутации силового ключа может быть применена при инженерном проектировании, а также при наладочных работах преобразователей в зависимости от режима работы электропривода.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антощенко Н. И. Новый подход к регулированию вентиляции угольных шахт [Текст] / Н. И. Антощенко, В. В. Калужный, В. П. Котиков, Г. Б. Тында, П. Д. Андриенко, А. В. Садовой // Уголь Украины. – 2014 – №3. – С. 29–32.
2. Онищенко Г. Б. Асинхронный вентиляционный каскад [Текст] / Г. Б. Онищенко. – М., Энергия, 1967. – 152 с.
3. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; – М.: Академия, 2004. – 256 с.
4. Волков И. В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях [Текст] / И. В. Волков, В. Н. Исаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.
5. Пат. України 64126, МПК H02P 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П. Д. Андриенко, М. І. Коцур, І. М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20, 2011 р. – Режим доступу: <http://www.uipv.org>.
6. Коцур М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. – С. 114–120.
7. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов; – М.: Высшая школа. – 2001. – 327 с.
8. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник [Текст] / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин; – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
9. WESTCODE. Каталог продукції. Режим доступу: <http://www.westcode.com/products.html>
10. Williams B. Power Electronics [Text] / B Williams. – Glasgow: Straitclaide University, 2006. – 825 p.
11. Ярымбаш С. Т. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока. [Текст] / С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 36–43.

Коцур М. І.¹, Коцур І. М.², Андриенко А. А.³, Андриенко Д. С.⁴

¹Канд. техн. наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

⁴Аспірант кафедри електропостачання промислових підприємств Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЧАСТОТИ КОМУТАЦІЇ ВЕНТИЛІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗА СХЕМОЮ ЧАСТОТНО-СТРУМОВОГО АСИНХРОННОГО-ВЕНТИЛЬНИХ КАСКАДА

У статті розглядається питання підвищення енергоефективності систем електроприводу шляхом визначення оптимального значення регульовального параметра перетворювача, що забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії системи електроприводу на прикладі частотно-струмового асинхронно-вентильного каскаду. Мета роботи полягає в розробці простій в реалізації методики визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача у вигляді аналітичних виразів при якій виконується умова мінімізації втрат в електроприводі. Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси перетворення енергії в системі двигун-перетворювач. Предметом дослідження є електропривід за схемою частотно-струмового асинхронно-вентильного каскаду. Наведено методику розрахунку втрат як в двигуні, так і в силових елементах перетворювача. Визначено цільову функцію сумарних втрат в електроприводі в залежності від частоти комутації силових ключів та коефіцієнтів гармонійних спотворень струмів статора та ротора асинхронного двигуна. Цільова функція сумарних втрат в електроприводі була перетворена до однокритеріальної залежності (частоти комутації силових ключів перетворювача.) За допомогою імітаційного моделювання виконано розрахунок втрат в електроприводі з урахуванням особливостей електромагнітних та енергетичних процесів для даного класу електроприводу, який підтвердив адекватність запропонованого спрощеного способу визначення оптимальної частоти комутації силових ключів в перетворювачі. Запропонована методика визначення оптимальної частоти комутації силового ключа, котра може бути застосована при налагоджувальних роботах перетворювачів, інженерному проектуванні електроприводу різних класів та режимів роботи.

Ключові слова: частота комутації, оптимізація, втрати, енергоефективність, перетворювач, двигун.

Kotsur M. I.¹, Kotsur I. M.², Andrienko A. A.³, Andrienko D. S.⁴,

¹Associate professor of department of electric and electronic apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Associate professor. Associate professor of department of electric machines, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³Postgraduate student of department of electric and electronic apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

⁴Postgraduate student of department of power supply of the industrial enterprises, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

DETERMINATION OF THE OPTIMAL SWITCHING FREQUENCY OF THE POWER SWITCHES OF THE FREQUENCY-CURRENT ASYNCHRONOUS-GATE CASCADE CONVERTERS

The article discusses the issue of increasing the energy efficiency of electric drive systems by determining the optimum value of the adjusting parameter converter, providing maximum efficiency of the drive system on the example of a frequency-current asynchronous gate cascade.

The aim work is to develop easy to implement methods for determining the optimum switching frequency of the power switches of the converter in the form of analytical expressions with which the condition of minimization of losses in the drive. The object of investigation is the process of converting electromagnetic energy in the motor-converter system. The subject of this investigation is frequency-current asynchronous-gate cascade drive system. The methods of calculation of the losses in the AC motor and the power converter elements are considered. The objective function of total losses in the electric drive system, depending on the switching frequency of the power switches and the total harmonic distortion of the stator and rotor currents AC motor are determined. As a result, the objective function of total losses in the electric drive system has been converted into the form of a single variable, depending only on the frequency switching keys of the power converter. With the help of the simulation of the losses in the drive control system, which based peculiarities of electromagnetic and energetic processes in this class drive system are calculated. The adequacy of the calculation of the proposed simplified method to determine the effective frequency of power switches in the converter are confirmed. The proposed method of the determining the optimal frequency switching of the power switchers can be applied to engineering design and commissioning of the converter depending on the class and modes of operation of the drive control system.

Keywords: switching frequency, optimization, losses, energy efficiency, the converter, the AC motor.

REFERENCES

1. Antoshhenko N. I., Kalyuzhniy V. V., Kotikov V. P., Ty'nda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V Niviy podhod k regulirovaniyu ventilyacii ugol'ny'h shaht. Ugol' Ukrainy', 2014, No 3, pp. 29–32.
2. Onishhenko G. B. Asinhronny'j ventil'ny'j kaskad. Moscow, E'nergiya, 1967, 152 s.
3. Braslavskiy I. YA., Ishmatov Z. SH., Polyakov V. N. Energoberegayushhiy asinhronniy electroprivod: Ucheb. posobie dlya stud. vy'ssh. ucheb. Zavedenij. Moscow, Akadimiya, 2004, 256 s.
4. Volkov I. V., Isakov V. N. Electroprivody' so stabilizirovanny'm tokom v silovy'h cepyah. Moscow, Radio i svyaz', 1991, 216 s.
5. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kulagin D. O., Kotsur, I. M. Andrienko D. S., Andrienko A. A Order on Patent Ukraine 10484. H02P5/74 Dvodvugunovuy elektropuvid impulsnogo reguluvannya uzgodzhenogo obertannya agreed rotation asunchronnuch dvuguniv z faznumu rotoramu [Two-motors pulsed electric drive the agreed regulation of rotation of asynchronous motors with phase rotor] (2015); aplicant and patentee ZNTU; Declared. 28.10.2015, URL: <http://www.uipv.org/> (In Ukraine)
6. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. Sravnitelniy analiz energoeffektivnosti system regulirovaniya AD s faznim rotorom. Polzunovskiy Vestnik, 2012, No 3 (19), pp. 114–120.
7. Kopy'lov I. P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. Moscow, Vy'sshaya shkola, 2001, 327 s.
8. Chebovskiy O. G., Moiseev L. G., Nedoshivin R. P. Silovy'e poluprovodnikovye pribory': Spravochnik. 2-e izd., pererab. I dop. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 400 s.
9. WESTCODE. Katalog produkcii. URL: <http://www.westcode.com/products.html>.
10. Wiliams B. Power Electronics. Glasgow: Straitclaide University, 2006, 825 p.
11. Yarymbash S. T., Kilimnik I. M., Yarymbash D. S. Osobennosti opredeleniya parametrov elektricheskoy schemy zamesheniya pechnoy petly pechi grafitacii peremennogo toka. *Electronics and Electricity*, 2010, No 2, pp. 36–43.