

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ЦЕПИ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА РОТОРА

М.И. Коцур, асп.

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, 69063, г. Запорожье, Украина

E-mail: kotsur_m@ukr.net

Разработана усовершенствованная схема импульсного регулирования асинхронного двигателя со сбросом избыточной энергии ротора в сеть. Рассмотрены особенности переходных процессов для данного способа управления. Выполнен сравнительный анализ энергетических показателей асинхронного двигателя и привода для усовершенствованной схемы импульсного регулирования и асинхронного вентильного каскада.

Ключевые слова: управление, двигатель, коммутация, рекуперация, инвертор.

Введение. В связи с ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе снижения электропотребления, приобретает особую актуальность [2]. Массовое использование асинхронных двигателей (АД) с фазным ротором на кранах всех видов, а также на металлургических приводах и других механизмах с продолжительным и повторно – кратковременным режимами работы стимулирует к совершенствованию конструктивных исполнений привода. К основным существующим способам управления АД с фазным ротором относятся резисторное регулирование, классическая схема импульсного регулирования (ИР) в цепи выпрямленного тока ротора и асинхронный вентильный каскад (АВК). Особый интерес представляет ИР, отличающийся простотой конструктивного исполнения, высокой плавностью регулирования в широком подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора АД. Однако при классической схеме ИР запасенная энергия в обмотках ротора рассеивается в виде тепла на резисторе, при этом снижается эффективность данного способа управления [2, 5].

Анализ предыдущих исследований. Анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов показал целесообразность применения каскадных схем, которые используются для управления АД с фазным ротором (АВК). Однако эффективная работа каскада возможна только на определенной частоте вращения при определенном напряжении ротора. Установленная мощность согласующего трансформатора и инвертора подбирается под это напряжение таким образом, чтобы обеспечить роботу инвертора с максимальными углами и с минимальным потреблением реактивной мощности. Таким образом, в асинхронном вентильном каскаде диапазон частоты вращения АД ограничен [1, 2]. Известны также средства управления с полупроводниковыми силовыми коммутаторами с использованием ограничителей перенапряжения, которые имеют особенности каскадных устройств при сбрасывании энергии скольжения в сеть и средства управления с нелинейными

ограничителями, в которых эта энергия рассеивается в виде тепла [6]. Недостатками этих конструкций является использование крупногабаритных дросселей, которые подключены к выводу каждой фазы обмотки ротора АД. Поэтому полезное использование избыточной энергии ротора при импульсном управлении основанного на каскадном принципе является актуальной задачей.

Цель работы. Усовершенствование схемы ИР с повышенными показателями энергоэффективности за счет возврата избыточной энергии ротора в сеть с фиксированным максимальным углом инвертирования.

Материал и результаты исследования. Автором предложена усовершенствованная схема импульсного регулирования с возвратом избыточной энергии обмотки ротора в сеть (рис. 1). Процесс возврата (рекуперации) энергии в сеть энергоснабжения выполняется в пуско-тормозных режимах, а также в квазиустановившемся режиме АД, работающего на заданном скольжении.

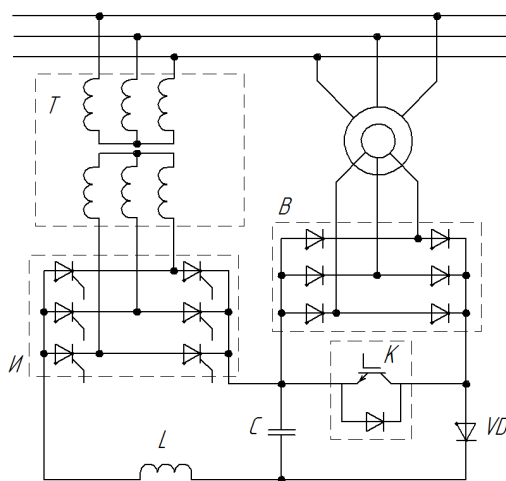


Рисунок 1 – Схема импульсного регулирования со сбросом избыточной энергии ротора в сеть

Рассмотрим два состояния схемы, определяющих переходные процессы в разные моменты времени, согласно [5]. Первое состояние схемы определяется при разомкнутом силовом ключе. В этот момент времени энергия ротора сбрасывается на конденсатор и дроссель инвертора (рис. 2).

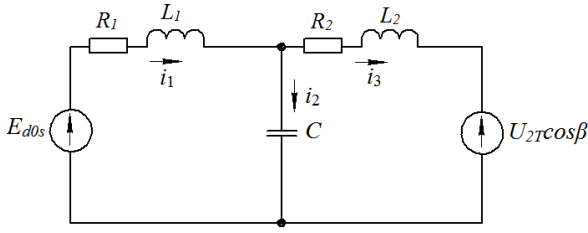


Рисунок 2 – Схема замещения роторной цепи при разомкнутом ключе

$$\begin{cases} R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt = E_{d0} \cdot s; \\ R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt} + R_2 \cdot i_3 = E_{d0} \cdot s - U_{2T} \cdot \cos \beta; \\ i_1 = i_2 + i_3, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$R_1 = 2 \cdot r_1 \cdot s + 2 \cdot r_2 + \frac{3 \cdot x_{\Delta} \cdot s}{\pi}, \quad L_1 = 2 \cdot L_{\Delta},$$

$$L_2 = L_{\Delta P} + L_{2T}, \quad R_2 = r_{\Delta P} + r_{2T} + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi},$$

r_1, r_2, r_{2T} – активные сопротивления фазы статора и ротора АД, приведенные к ротору; r_{2T} – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора; x_{Δ}, x_T – реактивные сопротивления АД и трансформатора, приведенные соответственно к ротору и вторичной обмотке трансформатора; $r_{\Delta P}, L_{\Delta P}$ – активное сопротивление и индуктивность дросселя инвертора.

Переходный процесс описывается следующими уравнениями:

$$i_1(t) = I_d + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}; \quad (2)$$

$$i_2(t) = C p_1 (R_1 + L_1 p_1) A_1 e^{p_1 t} + A_2 C p_2 \times \\ \times (R_1 + L_1 p_2) e^{p_2 t} + A_3 C p_3 (R_1 + L_1 p_3) e^{p_3 t}; \quad (3)$$

$$i_3(t) = -\frac{A_1}{C p_1 (L_2 p_1 + R_2)} e^{p_1 t} - \\ -\frac{A_2}{C p_2 (L_2 p_2 + R_2)} e^{p_2 t} - \frac{A_3}{C p_3 (L_2 p_3 + R_2)} e^{p_3 t}; \quad (4)$$

$$u_2(t) = (R_1 + L_1 p_1) A_1 e^{p_1 t} + \\ + A_2 (R_1 + L_1 p_2) e^{p_2 t} + A_3 (R_1 + L_1 p_3) e^{p_3 t}, \quad (5)$$

где корни характеристического уравнения:

$$p_1 = 2 \sqrt{-\frac{r}{3} \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) - \frac{CR_1 L_2 + CL_1 R_2}{3CL_1}};$$

$$p_2 = -2 \sqrt{-\frac{r}{3} \cos\left(\frac{\alpha}{3} + \frac{2\pi}{2}\right) - \frac{CR_1 L_2 + CL_1 R_2}{3CL_1}};$$

$$p_3 = -2 \sqrt{-\frac{r}{3} \cos\left(\frac{\alpha}{3} - \frac{2\pi}{2}\right) - \frac{CR_1 L_2 + CL_1 R_2}{3CL_1}};$$

$$\alpha = \arccos\left(-q / 2 \sqrt{-(r/3)^3}\right);$$

$$r = -\frac{(CR_1 L_2 + CL_1 R_2)^3}{3CL_1^3} - \frac{(R_1 R_2 C + L_1 L_2)}{CL_1};$$

$$q = 2 \left(\frac{(CR_1 L_2 + CL_1 R_2)^3}{3CL_1} \right) - \\ - \frac{[CR_1 L_2 + CL_1 R_2][R_1 R_2 C + L_1 L_2] + R_2 + R_1}{(CL_1)^2 + CL_1},$$

постоянные коэффициенты интегрирования:

$$A_1 = I_{d \max} \frac{-I_{d \max} p_1 (R_1 + L_1 p_1) (p_2 - p_1)}{(p_2 - p_1)[p_3 (R_1 + L_1 p_3) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)] - \\ - (p_3 - p_1)[p_2 (R_1 + L_1 p_2) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)]} - \\ - \frac{U_{2T} \cos \beta - E_{d0s} - I_{d \max} (R_1 + L_1 p_1)}{L_1 (p_2 - p_1)} + \\ + \frac{I_{d \max} p_1 (R_1 + L_1 p_1)}{[p_3 (R_1 + L_1 p_3) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)] - \\ - (p_3 - p_1)[p_2 (R_1 + L_1 p_2) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)]}$$

$$A_2 = \frac{U_{2T} \cos \beta - E_{d0s} - I_{d \max} (R_1 + L_1 p_1)}{L_1 (p_2 - p_1)} - \\ - \frac{I_{d \max} p_1 (R_1 + L_1 p_1)}{[p_3 (R_1 + L_1 p_3) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)] - \\ - (p_3 - p_1)[p_2 (R_1 + L_1 p_2) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)]}$$

$$A_3 = I_{d \max} \frac{-I_{d \max} p_1 (R_1 + L_1 p_1) (p_2 - p_1)}{(p_2 - p_1)[p_3 (R_1 + L_1 p_3) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)] - \\ - (p_3 - p_1)[p_2 (R_1 + L_1 p_2) - p_1 (R_1 + L_1 p_1)]}$$

Следующее состояние схемы определяется при замкнутом ключе (рис. 3 а, б). При этом обмотка ротора замкнута. Конденсатор сбрасывает энергию через дроссель и инвертор в сеть энергоснабжения. При этом диод VD (рис. 1) предотвращает появление обратного тока с конденсатора.

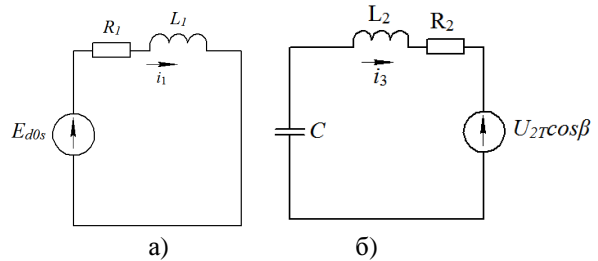


Рисунок 3 – Схема замещения роторной цепи при замкнутом ключе

Для контура (рис. 3 а) переходный процесс описывается следующим выражением:

$$i_1 = I_{d \min} \left(1 - e^{-\frac{R_1}{2L_1} t} \right), \quad (6)$$

где

$$I_{d \min} = \frac{E_{d0s}}{R_1}.$$

Для второго контура (рис. 3 б) дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{C} \int i_3(t) dt + R_2 i_3 + L_2 \frac{di_3}{dt} = -U_{2T} \cos \beta. \quad (7)$$

Переходный процесс для данного контура описывается уравнениями:

$$u_c(t) = \frac{u_c(0) + U_{2T} \cos \beta}{\sqrt{L_2 C \omega_0}} e^{-\delta t} \sin \left(\omega_0 t + \arctg \frac{\omega_0}{\delta} \right) - \quad (8)$$

$$-U_{2T} \cos \beta;$$

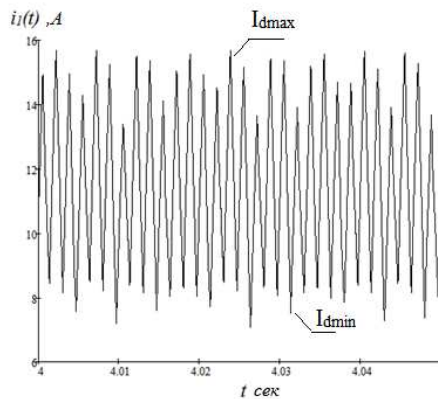
$$i_3(t) = C \frac{du_c}{dt} = \frac{u_c(0) + U_{2T} \cos \beta}{L_2 \omega_0} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - \quad (9)$$

$$-U_{2T} \cos \beta,$$

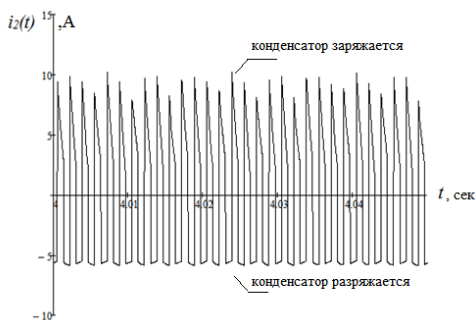
где

$$\delta = \frac{R_2}{2L_2}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{2L_2 C} - \left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2}.$$

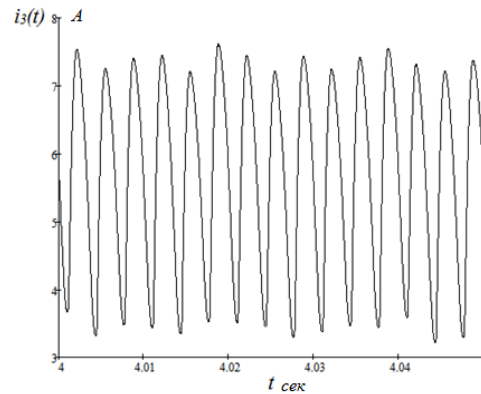
Математическое описание переходных процессов подтверждается результатами моделирования [3]. На рис. 4 приведен фрагмент переходного процесса в цепи выпрямленного тока ротора в квазиустановившемся состоянии АД МТФ-111-6, $P_n=3,5$ кВт при частоте коммутации ключа $f_k=600$ Гц, $\gamma=0,52$ ($n=400$ об/мин), $\beta=10^\circ$ и $u_c=409$ В, значение которого соответствует номинальному напряжению переменного тока ротора. Так как частота вращения ротора регулируется только значением γ , при этом угол управления инвертора соответствует минимально допустимому значению $\beta_{\min}=10^\circ$. Благодаря этому потребление реактивной энергии инвертором минимально. В табл. 1 приведены значения размаха пульсации тока i_1 , i_2 , и напряжения u_c при переменном значении частоты коммутации f_k . Согласно табл. 1, с увеличением частоты коммутации f_k ключа значения пульсации i_1 , u_c снижаются. Однако значение f_k ключа не влияет на размах пульсации тока дросселя инвертора Δi_3 , а зависит от значения индуктивности самого дросселя.



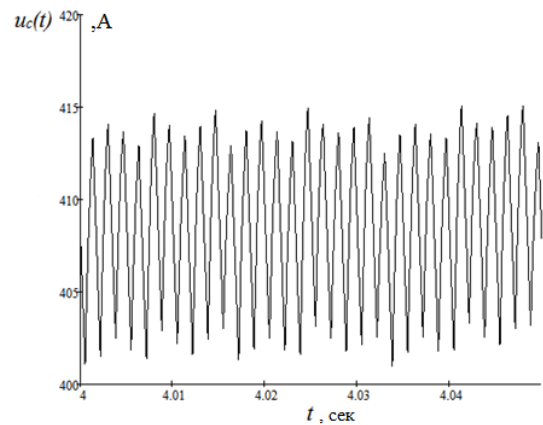
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Фрагмент переходных процессов в цепи выпрямленного тока ротора при квазиустановившемся состоянии АД: а) ток выпрямителя В; б) ток конденсатора С; в) ток дросселя инвертора И; г) напряжение на конденсаторе С.

Таблица 1 – Размах пульсаций при $f_k = \text{var}$

	$f_k=600$ Гц	$f_k=1200$ Гц	$f_k=3000$ Гц
$\Delta i_1, A$	6	3,5	1,5
$\Delta i_3, A$	4	4	4
$\Delta u_1, B$	14	6	2

Согласно методике [4, 5], были рассчитаны энергетические показатели АД и привода под управлением ИР и АВК при разных значениях рабочего скольжения (рис. 5, 6). Анализ графиков показал, что при управлении ИР, по сравнению с АВК, лучшие энергетические показатели.

Однако с увеличением скольжения значения $\cos \varphi$ и η снижаются за счет роста дополнительных потерь, которые вызваны увеличением гармонического состава токов статора и ротора. С увеличением частоты коммутации f_k значения этих показателей повышаются.

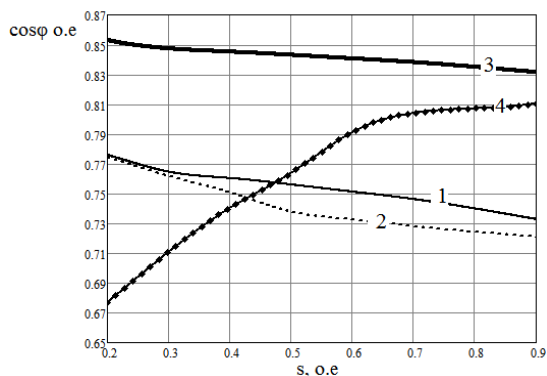


Рисунок 5 – Зависимость $\cos\varphi=f(s)$: 1 – $\cos\varphi$ АД при ИР с $f_k=3000$ Гц; 2 – $\cos\varphi$ АД при АВК; 3 – $\cos\varphi$ привода при ИР с $f_k=3000$ Гц; 4 – $\cos\varphi$ привода при АВК

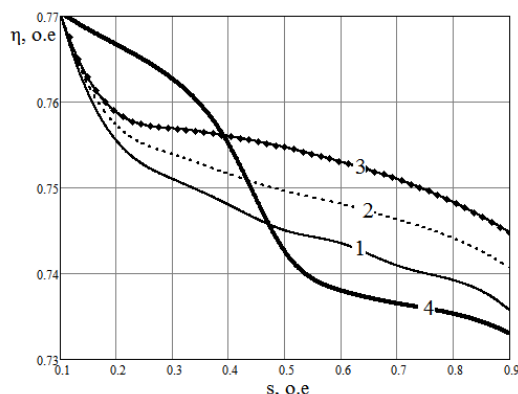


Рисунок 6 – Зависимость $\eta=f(s)$: 1 – КПД привода при ИР с $f_k=600$ Гц; 2 – КПД привода при ИР с $f_k=1200$ Гц; 3 – КПД привода при ИР с $f_k=3000$ Гц; 4 – КПД привода при АВК

Выводы. Для разработанной схемы рассмотрены особенности переходных процессов импульсного регулирования со сбросом избыточной энергии ротора в сеть с фиксированным углом управления инвертора β_{\min} .

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СХЕМИ ІМПУЛЬСНОГО КЕРУВАННЯ В КОЛІ ВИПРЯМЛЕННОГО СТРУМУ РОТОРА

М. І. Коцур, асп.

*Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна
E-mail: kotsur_m@ukr.net*

Розроблена удосконалена схема імпульсного керування асинхронного двигуна із скиданням залишкової енергії ротора у мережу. Розглянуті особливості перехідних процесів для заданого способу керування. Виконано порівняльний аналіз енергетичних показників асинхронного двигуна та приводу для вдосконаленої схеми імпульсного керування та асинхронного вентильного каскаду.

Ключові слова: керування, двигун, комутація, рекуперація, інвертор.

INCREASE IN THE ENERGY-EFFECTIVENESS OF THE CIRCUIT FOR PULSE CONTROL IN THE CHAIN OF THE RECTIFIED CURRENT OF THE ROTOR

M. Kotsur, post-grad.

*Zaporizhzhya National Technical University
vul. Zhukovskogo, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine
E-mail: kotsur_m@ukr.net*

The circuit for pulse control of induction motor with the discharge of the excess energy of rotor into the network was developed. The special features of transient processes for this method of control were examined. The comparative analysis of the energy indices of induction motor and drive for the circuit for pulse control and asynchronous valve cascade was executed.

Key words: drive, motor, switching, regeneration, inverter.

При этом достигнут эффект повышения коэффициента мощности привода за счет снижения потребления реактивной мощности. Выполнен сравнительный анализ энергетических показателей АД и привода при управлении АВК и ИР с преобладающими показателями последнего. Увеличение частоты коммутации силового ключа в цепи выпрямленного тока ротора приводит к снижению пульсации выпрямленного тока ротора, а следовательно, к повышению энергетических показателей АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов и др.; под общ. ред. Онищенко Г.Б. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
2. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. Заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишмагов, В.Н. Поляков; под общ. ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.–256 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – Санкт-Петербург.: 2001. – 320 с.
4. Вентильные каскады / Э.Е. Парфенов, В.А. Прозоров. – Л., Энергия, 1968. – 92 с.
5. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора / М.М. Соколов, П.Е. Данилов. – М.: Энергия, 1972. – 72 с.
6. Патент 2393622 Росія, МПК⁴ Н 02 Р 27/05. Способ управления процессами преобразования энергии в асинхронном двигателе с фазным ротором [Электронный ресурс] / С.П. Лохов, Д.Н. Кравец, А.М. Борисов, С.А. Фомин; заявл. 11.12.08; опубл. 27.06.10, Бюл. № 1. – Режим доступа: <http://www.fips.ru>

Стаття надійшла 30.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Каліновим А.П.