

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур

Предложена модифицированная система импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором. Проведен сравнительный анализ коэффициентов гармонических искажений токов статора и ротора асинхронного двигателя, а также энергетических показателей привода модифицированной системы импульсного регулирования с асинхронным вентильным каскадом и классической системой импульсного регулирования.

Ключевые слова: регулирование, асинхронный двигатель, гармоники, энергоэффективность, импульс.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В современных электротехнических комплексах кранового оборудования и конвейерных систем растет потребность в модернизации устаревших контакторных, резисторных схем регулирования, предназначенных для асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором, составляющих значительный удельный вес во всем классе систем регулирования АД. Полная замена устаревших систем регулирования на системы с частотно-регулируемым преобразователем (ЧРП) не всегда экономически целесообразна, особенно для механизмов, работающих в кратковременных и повторно-кратковременных режимах [1, 2].

Кроме систем с ЧРП также большой интерес представляют энергосберегающие системы асинхронного вентильного каскада (АВК). Однако их использование ограничено высокой стоимостью и низким коэффициентом мощности привода. Поэтому АВК в основном используются для продолжительного режима работы в условиях редких пусков и торможений [1].

Для регулирования частоты вращения АД с фазным ротором также применяется классическая система импульсного регулирования (ИРк), которая сочетает в себе простоту схемного решения, хорошие регулировочные свойства и имеет относительно низкую стоимость. Однако при этом она имеет низкий коэффициент полезного действия (К.П.Д) и поэтому используется в основном в повторно-кратковременных режимах работы [6].

В работах [3,4] была предложена модифицированная система импульсного регулирования (ИРм), которая объединяет в себе положительные свойства классических систем ИР и АВК (рисунок 1). Отличительной особенностью данной системы ИР(м) является

наличие импульсного регулятора в цепи выпрямленного тока ротора, представленного в виде преобразователя повышающего типа и инвертора, который в отличие от АВК, работает с постоянным минимальным углом инвертирования.

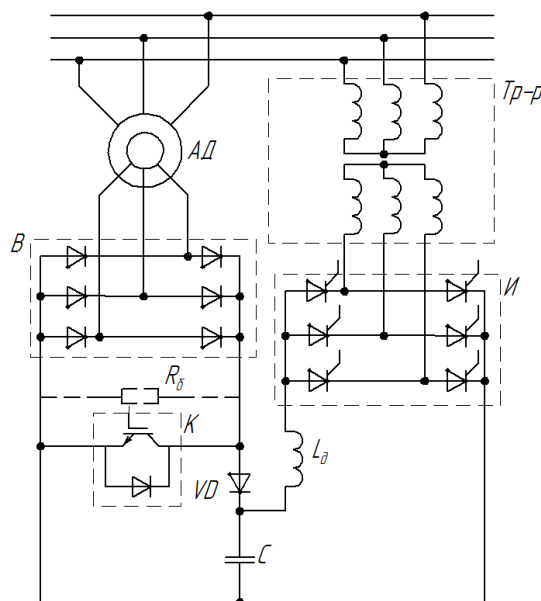


Рисунок 1 – Модифицированная система ИР АД с фазным ротором

За счет этого обеспечивается высокий коэффициент мощности привода в широком диапазоне скольжения АД, а также появляется возможность рационального выбора параметров оборудования от желаемого КПД, зависящих от режима работы ИР(м).

В связи с этим целесообразно сопоставить показатели энергоэффективности рассматриваемых систем АД с фазным ротором, обеспечивающих работу привода в подсин-

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

хронном диапазоне частоты вращения ротора, а также разработать рекомендации по эффективному применению системы ИР(м) в зависимости от режимов работы механизма.

Целью работы является исследование и проведение сравнительного анализа энергоэффективности модифицированной системы импульсного регулирования АД с фазным ротором ИР(м) в разных режимах ее работы по сравнению с классической системой ИР и АВК.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Для исследования электромагнитных и энергетических процессов в АД с системами ИР(м), ИР(к) и АВК в структуре средств Simulink в среде Matlab была разработана имитационная модель асинхронного привода. В качестве объекта исследования был выбран АД с фазным ротором типа МТФ-111-6 ($P_H=3,5$ кВт (ПВ=0.4), $I_{sH}=10,4$ А, $I_{rH}=15$ А, $M_{сH}=39$ Н·м, $n_H=900$ об/мин ($s_H=0,1$)).

Рассмотрим возможные режимы работы модифицированной системы импульсного регулирования ИР(м). В зависимости от параметров возможны три режима работы: режим непрерывного тока ротора без балластного резистора (режим 1), режим непрерывного тока с балластным резистором (режим 2), а также режим прерывистого тока без балластного резистора (режим 3).

При работе системы ИР(м) в режиме 1 обеспечивается непрерывная рекуперация полезной энергии ротора в сеть. При этом накопленная энергия в обмотке ротора W_L , вызванная постоянной коммутацией силового ключа К, сбрасывается на конденсатор С, исключая перенапряжение в обмотке ротора [5].

Накопленная энергия в обмотке ротора описывается следующим выражением

$$W_L = \frac{L \cdot (i_{dmax} - i_{dmin})^2}{2} \cdot f_k, \quad (1)$$

где L – полная индуктивность АД, Гн;

i_{dmax} – максимальная величина мгновенного значения выпрямленного тока ротора, А;

i_{dmin} – минимальная величина мгновенного значения выпрямленного тока ротора, А;

f_k – частота коммутации силового ключа, Гц.

Второй режим работы системы ИР(м) обеспечивается за счет введения в цепь вы-

прямленного тока ротора балластного резистора R_δ (рисунок 1). Изменение величины

R_δ приводит к перераспределению полезной энергии ротора. Часть энергии рассеивается в виде тепла на R_δ , а остальная ее часть вместе с запасенной энергией в обмотке ротора рекуперируется в сеть электроснабжения. Важной особенностью данного режима является возможность рационального выбора величины R_δ , при которой запасенная энергия в обмотке ротора W_L должна быть полностью сброшена в сеть [5].

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициентов кратности токов статора β_{Is} и ротора β_{Ir} от величины балластного резистора R_δ^* . Здесь величина R_δ^* приведена к номинальному значению сопротивления ротора исследуемого АД ($R_{rH}=6\Omega$). Для разных значений

f_k определены минимальные граничные значения R_δ^* , при которых обеспечивается

снижение токовой нагрузки обмотки статора и ротора. Снижение токовой нагрузки АД вызвано сбросом накопленной энергии в обмотке ротора в сеть электроснабжения, которая обусловлена пульсацией выпрямленного тока ротора. При увеличении f_k снижение токовой нагрузки АД выполняется при меньшем значении R_δ^* , (при $f_k=0,6$ кГц, $R_\delta^*=8,2$ о. е.; при $f_k=3$ кГц, $R_\delta^{**}=6,8$ о. е.). При условии

$R_\delta^* \geq R_\delta^{**}$ (для $f_k=0,6$ кГц) и $R_\delta^* \geq R_\delta^{**}$ (для $f_k=3$ кГц) токовая нагрузка не изменяется.

Полученные значения R_δ^* для ИР(м) в 1,5-1,8

раза превышают R_δ^* для системы ИР(к)

($R_\delta^*=4,5$ о. е). Согласно [6], R_δ^* для системы ИР(к) выбирается, исходя из максимально допустимого напряжения ротора.

Для системы ИР(м), работающей в режимах 1 и 2, при выполнении условия $R_\delta^* \geq R_\delta^{**}$ величины β_{Is} и β_{Ir} имеют одинаковое значение на всем диапазоне рабочих скольжений [4].

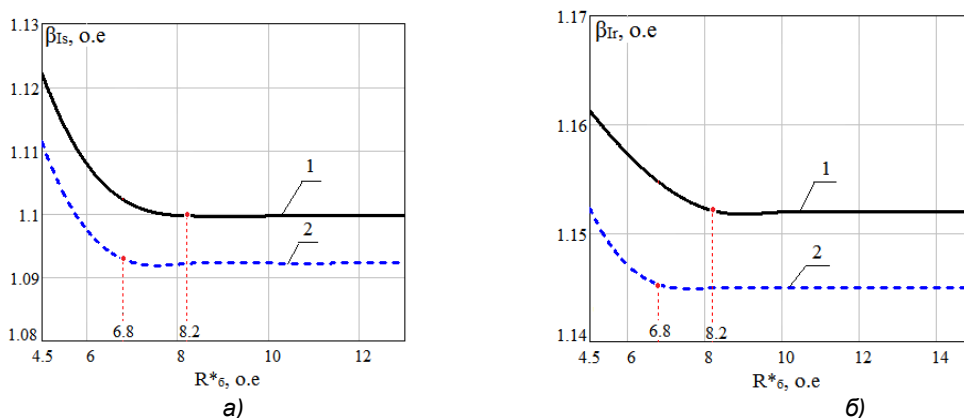


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента кратности тока от балластного резистора при $s=0,9$ для $f_k=0,6$ кГц (кривая 1) и $f_k=3$ кГц (кривая 2): а) статора; б) ротора

Коэффициент токовой нагрузки определяется с помощью выражения

$$\beta_{Is,r} = \frac{I_{s,r}}{I_{Hs,r}}, \quad (2)$$

где $I_{s,r}$ – значения тока статора и ротора при заданном рабочем скольжении s ;

$I_{Hs,r}$ – номинальное значение тока статора и ротора АД.

Таким образом, приведенная зависимость токовой нагрузки статора и ротора АД от балластного резистора и частоты коммутации силового ключа (рисунок 3), позволит произвести рациональный выбор балластного резистора, который обеспечит минимальный ток статора и ротора АД.

Работа системы ИР(м) входит в режим 3 при согласовании напряжений выпрямителя и инвертора, а также при выполнении условия

$$(1-\gamma) \cdot T \leq T_{er}, \quad (3)$$

где γ – коэффициент заполнения импульса;

$$T = \frac{1}{f_k} \text{ – период коммутации ключа;}$$

T_{er} – электромагнитная постоянная ротора.

Режим прерывистого тока достигается при более низком значении частоты коммутации ключа $f_k=(90\dots160)$ Гц в зависимости от величины скважности ключа γ .

В таблице 1 приведены расчетные значения пульсации выпрямленного тока ротора

ΔI_d и коэффициентов гармонических искажений токов статора (THD_s) и ротора (THD_r) в квазиустановившемся состоянии АД МТФ-111-6, при рабочих скольжениях $s=0,2, 0,5, 0,9$ (для режима 1 – $f_k=3$ кГц, угол управления инвертором $\beta=10^\circ$, емкость конденсатора $C=400$ мкФ; для режима 2 – $f_k=3$ кГц, $\beta=10^\circ$, $C=400$ мкФ, $R_\sigma=50$ Ω ; для режима 3 – соответственно для $s, f_k=90,160,120$ Гц, $\beta=10^\circ$, $C=400$ мкФ).

Из анализа полученных результатов (таблица 1) следует, что наибольшая величина пульсации выпрямленного тока ротора, вызванная постоянной коммутацией в цепи ротора, имеет место при рабочем скольжении $s=0,5$. В данном случае эта величина соответствует скважности ключа γ равной 0,5. Дальнейшее снижение γ приводит к росту THD_s и THD_r и в области ползучих скоростей АД ($0,8 < s < 1$) принимают наибольшее значение. Стоит отметить, что наличие ВГ тока ротора приводит к появлению ВГ составляющих тока статора через индуктивность воздушного зазора АД.

В режиме прерывистого тока, в отличие от ранее рассмотренных, имеет место наибольшая пульсация выпрямленного тока ротора АД. При этом величина W_L возрастает в 10-12 раз в сравнении с остальными режимами, что приводит к существенным токовой и тепловой нагрузкам АД [5].

Проведем сравнительный анализ расчетных значений THD_s и THD_r в квазиустановившемся состоянии исследуемого АД с системами регулирования ИР(м), АВК и ИР(к).

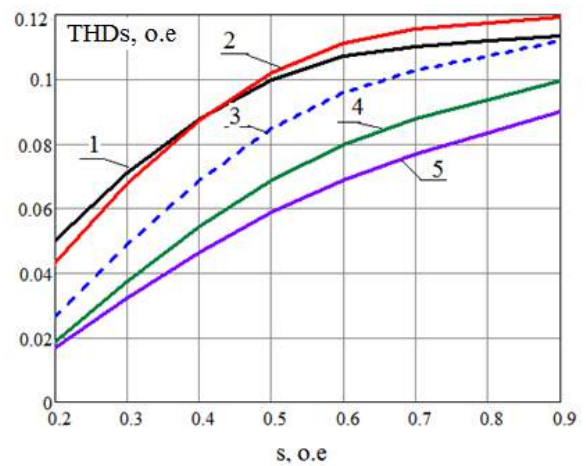
**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Таблица 1 – Расчетные значения ΔI_d , THD_s , THD_r , МТФ-111-6 с ИР(м)

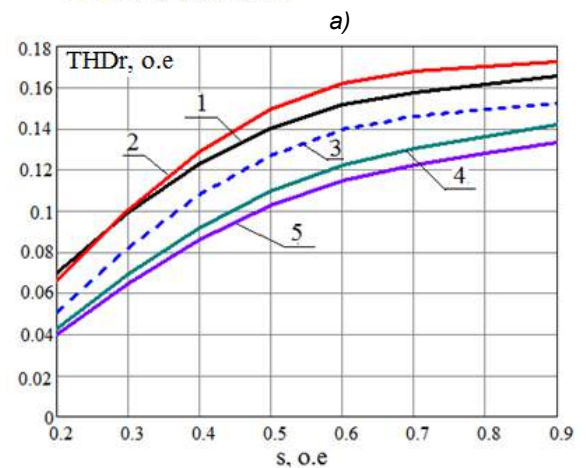
	ИР(м) в режиме непрерывного тока с ($R_6=0$), при $f_k=3$ кГц			ИР(м) в режиме прерывистого тока			ИР(м) в режиме непрерывного тока ($R_6^*=6,8$), при $f_k=3$ кГц		
	s, o.e								
	0,2	0,5	0,9	0,2	0,5	0,9	0,2	0,5	0,9
ΔI_d , А	0,6	1,5	1,3	17	23	25	0,7	1,8	1,2
THD_s , o.e	0,017	0,066	0,086	0,28	0,30	0,43	0,018	0,067	0,086
THD_r , o.e	0,045	0,115	0,132	0,39	0,63	0,105	0,117	0,132	0,137

На рисунке 3 приведены зависимости расчетных значений THD_s и THD_r исследуемого АД от величины рабочего скольжения s для систем АВК, ИР(к) с частотой коммутации силового ключа $f_k=0,6$ кГц; 1,2 кГц и 3 кГц и ИР(м) с $f_k=3,0$ кГц. Из зависимостей рисунка 3 следует, что для ИР(к) увеличение f_k приводит к снижению THD_s и THD_r тока статора и ротора АД. При этом для $f_k=0,6$ кГц при $s=0,9$, $THD_s=0,12$, $THD_r=0,17$ (что соответственно на 0,5 % и 0,75 % выше в сравнении с АВК); при $f_k=1,2$ кГц: $THD_s=0,11$, $THD_r=0,15$, (на 0,6 % и 1,25 % ниже в сравнении с АВК); при $f_k=3$ кГц: $THD_s=0,1$, $THD_r=0,14$ (на 1,8 % и 2,3 % ниже в сравнении с АВК). Стоит отметить, что снижение значения частоты коммутации f_k для систем ИР с ростом рабочего скольжения АД, приводит к увеличению скорости изменения значений THD_s и THD_r . Для систем ИР(к) и ИР(м) в режиме непрерывного тока ротора наилучшие результаты получены при частоте коммутации $f_k=3$ кГц. Дальнейшее увеличение f_k не приводит к существенному изменению электромагнитных параметров АД [3].

Таким образом, наименьшие значения коэффициентов гармонических искажений токов статора и ротора АД получены для системы ИР(м) в сравнении с ИР(к). Снижение значений этих коэффициентов обусловлено исключением перенапряжения в обмотке ротора за счет рекуперации накопленной энергии в обмотке ротора в сеть.



1 — АВК
2 — ИР(к) при $f_k=600$ Гц
3 — ИР(к) при $f_k=1200$ Гц
4 — ИР(к) при $f_k=3000$ Гц
5 — ИР(м) при $f_k=3000$ Гц



1 — АВК
2 — ИР(к) при $f_k=600$ Гц
3 — ИР(к) при $f_k=1200$ Гц
4 — ИР(к) при $f_k=3000$ Гц
5 — ИР(м) при $f_k=3000$ Гц

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента гармоник от рабочего скольжения для МТФ-111-6 $P_n=3,5$ кВт при разных способах управления:

а) статора; б) ротора

На следующем этапе исследований был проведен сравнительный анализ показателей энергоэффективности привода АД с системами АВК, ИР(к) и ИР(м).

В таблице 2 приведены значения коэффициента полезного действия привода (η_n) для систем ИР(м), ИР(к) и АВК. Анализ результатов показал, что наибольшее значение η_n имеет АВК в диапазоне рабочего скольжения $s = s_{\text{ест}} \dots 0,3$. При $s > 0,3$ η_n для ИР(м) выше по сравнению с АВК. В режиме прерывистого тока ИР(м) имеет место низкое значение η_n , что, с одной стороны, приводит к снижению величины установленной мощности инвертора, с другой – повышению потерь в обмотках АД. Поэтому использование ИР(м) в данном режиме не желательно.

Проведено исследование влияния величины балластного резистора R_b на η_n и установленную мощность инвертора. Получена зависимость η_n и установленной мощности инвертора от величины R_b^* (рисунок 4, 5), позволяющая рационально подобрать параметры оборудования от желаемого КПД в зависимости от назначения промышленного механизма.

Увеличение значения R_b^* приводит к перераспределению полезной энергии ротора. При этом доля возвращаемой в сеть энергии увеличивается. В случае, когда $R_b^* \rightarrow \infty$ работа системы ИР(м) переходит в режим 1.

Таблица 2 – Расчетные значения η_n АВК, ИР(к) и ИР(м) при разных значениях s

Система регулирования	s, о. е			
	0,3	0,5	0,7	0,9
АВК	76,3	74,2	73,6	73,3
ИР(к) при $f_k = 0,6$ кГц ($R_b^* = 4,5$ о. е)	59,8	42,0	25,1	8,2
ИР(к) при $f_k = 3$ кГц ($R_b^* = 4,5$ о. е)	60,1	42,4	25,4	8,4
ИР(м) в режиме непрерывного тока при $f_k = 3$ кГц	76,0	75,4	74,7	74,2
ИР(м) в режиме прерывистого тока	69,5	62,4	56,2	49,4

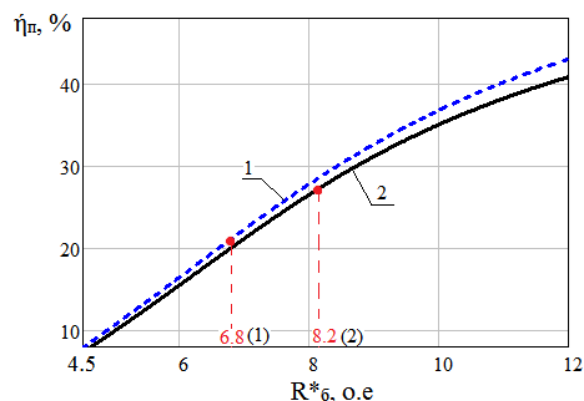


Рисунок 4 – Зависимость КПД привода от балластного резистора для ИР(м), при $s=0,9$:
 1 – при $f_k = 3$ кГц;
 2 – при $f_k = 600$ Гц

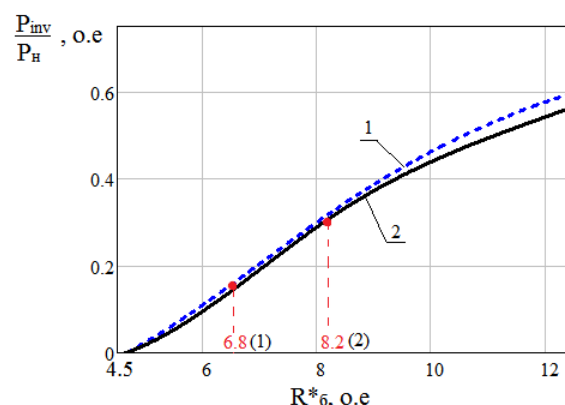


Рисунок 5 – Зависимость установленной мощности инвертора от балластного резистора для ИР(м), при $s=0,9$:
 1 – при $f_k = 3$ кГц;
 2 – при $f_k = 600$ Гц

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

На рисунке 6 приведены зависимости коэффициентов мощности в квазиустановившемся состоянии исследуемого АД от рабочего скольжения: для АВК; ИР(к) при разных значениях частоты коммутации силового ключа $f_k=0,6$ кГц, $f_k=1,2$ кГц, $f_k=3$ кГц; ИР(м) при $f_k=3$ кГц. С ростом скольжения для всех систем регулирования величина коэффициента мощности снижается до 0,72. Как было показано выше, это вызвано ростом THD_s и THD_r токов статора и ротора АД. Здесь наибольшее значение коэффициента мощности АД в диапазоне скольжений $s=0,3-0,8$ имеет место при ИР(м) в режиме непрерывного тока (кривая 5, рисунок 6). При этом коэффициент мощности АД при ИР(м) в режиме непрерывного тока выше на 0,8–1 % относительно ИР(к) при $f_k=3$ кГц, что является следствием снижения THD_s и THD_r , вызванного сбросом накопленной энергии в обмотке ротора в сеть.

На рисунке 7 приведены зависимости коэффициента мощности АД и привода (k_M) от рабочего скольжения для ИР(м), в режиме непрерывного тока, и АВК. Из полученных результатов следует, что коэффициент мощности привода для ИР(м) поддерживается на высоком уровне по сравнению с АВК. Так как сброс энергии в сеть электроснабжения при ИР(м) производится при фиксированном минимальном угле управления инвертора β , то это приводит к относительно минимальному потреблению реактивной мощности инвертором из сети на всем диапазоне изменения скольжения АД. При этом уменьшение k_M ИР(м) относительно k_M АД ИР(м) составляет не более 0,7 % при изменении скольжения в пределах $s=0,1-0,9$.

Коэффициент мощности привода k_M с ростом значения рабочего скольжения для системы ИР(м) изменяется в пределах $k_M=0,78-0,73$. Для АВК с ростом рабочего скольжения коэффициент мощности привода изменяется в пределах $k_M=0,58-0,72$, что вызвано снижением потребления реактивной мощности инвертором из сети.

Для полноты исследования энергоэффективности привода системы ИР(м) на рисунке 8 приведены зависимости коэффициента мощности привода от рабочего скольжения для возможных режимов ее работы.

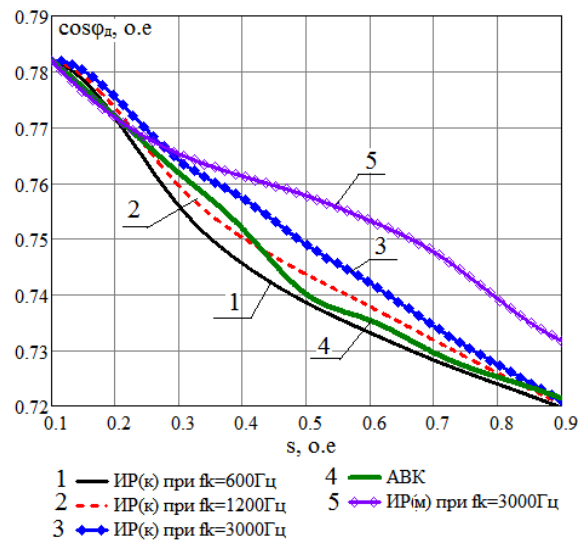


Рисунок 6 – Зависимости коэффициентов мощности АД при ИР(к), ИР(м) и АВК

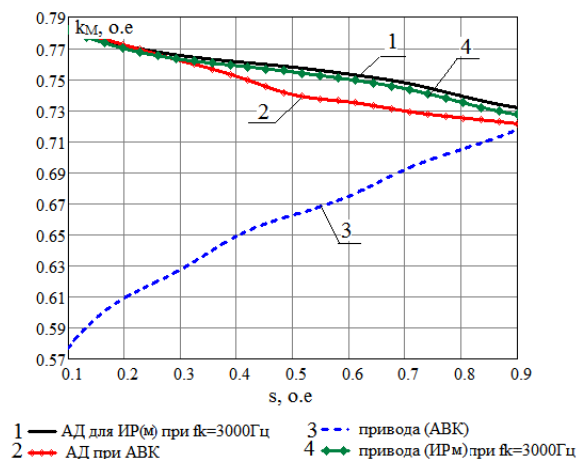


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента мощности привода и АД при АВК и ИР(м)

За счет фиксированной минимальной величины угла инвертирования системы ИР(м) обеспечивается высокое значение коэффициента мощности привода для всех трех режимов работы на всем диапазоне изменения скольжения по сравнению с АВК.

ВЫВОДЫ.

Предложена модифицированная система импульсного регулирования АД с фазным ротором.

Рассмотрены возможные режимы работы модифицированной системы импульсного регулирования АД: режим непрерывного тока без балластного резистора, непрерывного тока с балластным резистором, а также режим прерывистого тока без балластного резистора.

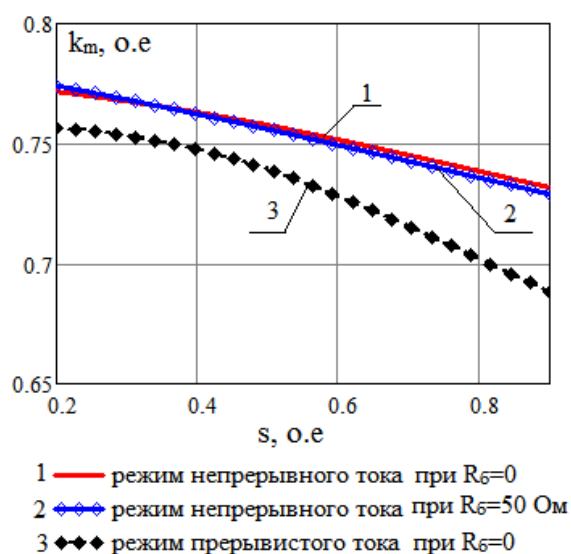


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента мощности привода от рабочего скольжения для системы ИР(М) в 3-х режимах ее работы

Выполнен сравнительный анализ показателей энергоэффективности модифицированной системы импульсного регулирования в сравнении с классической системой импульсного регулирования и асинхронным вентильным каскадом. Определены коэффициенты гармонических искажений токов статора и ротора АД и их влияние на энергетические показатели привода.

Установлено, что применение модифицированной схемы импульсного регулирования позволяет в зависимости от мощности инвертора $(0,17 \div 0,29)P_H$ повысить К.П.Д. системы регулируемого АД по сравнению с классической системой ИР на $13 \div 20$ % при рабочем скольжении $s=0,9$. При этом достигнуто повышение коэффициента мощности привода до величины $0,78 \div 0,73$ в диапазоне изменения рабочего скольжения $(0,1 \div 0,9)$.

Для механизмов, работающих в продолжительном режиме работы, а также в повторно-кратковременных режимах с большим значением ПВ наиболее оптимальным является режим непрерывного тока без балластного резистора. Для механизмов, работаю-

щих в повторно-кратковременном режиме с малым значением ПВ, в условиях частых пусков и торможений, а также имеющих повышенные требования к вибрации, оптимальным является режим непрерывного тока с балластным резистором. Режим прерывистого тока без балластного резистора модифицированной системы ИР АД с фазным ротором наиболее рационально использовать в кратковременном режиме работы механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок [Текст] / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов и др.; под общ. ред. Г. Б. Онищенко. – М. : РАСХН, 2001. – 520 с.
2. Краново-металлургические электродвигатели [Текст] / Н. М. Баталов, В. А. Белый, А. Б. Иоффе и др. – М. : Энергии, 1967. – 238 с.
3. Коцур М. И. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М.И. Коцур // Электромеханические и энергосберегающие системы. – Кременчуг : КрНУ, 2011, – № 2(14). – С. 86-89.
4. Коцур, М. И. Особенности выбора балластного сопротивления для схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. И. Коцур // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев : Техника, 2011, – № 4(80). – С. 56–61.
5. Коцур, М. И. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур, // Электромеханические и энергосберегающие системы. – Кременчуг : КрНУ, 2012, – № 3(19). – С. 163–165.
6. Соколов, М. М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. М. Соколов, П. Е. Данилов. – М. : Энергия, 1972. – 72 с.

Коцур М. И., к.т.н., доцент, E-mail: kotsur_m@ukr.net; **Андриенко П. Д.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, E-mail: andrpd@ukr.net, Украина, г. Запорожье, Запорожский национальный технический университет, кафедра "Электрические и электронные аппараты"; **Коцур И. М.**, к.т.н., доцент, E-mail: kotsur@zntu.edu.ua, Украина, г. Запорожье, Запорожский национальный технический университет, кафедра "Электрические машины".