

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ ТОКА

А. В. ВолковЗапорожская государственная инженерная академия
просп. Ленина, 226, г. Запорожье, 69006, Украина. E-mail: volkov_av@ukr.net**И. А. Косенко**

ОАО "Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь». E-mail: sotigor@gmail.com

Выполнено исследование влияния изменения параметров элементов (емкости конденсаторов, активных сопротивлений статора двигателя и демпфирующих резисторов, установленных на входе активного выпрямителя) силовой схемы асинхронного электропривода с автономным инвертором тока и активным выпрямителем тока на работоспособность, быстродействие и энергетические показатели прогнозирующего управления в установленных и динамических режимах этого электропривода.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, автономный инвертор тока.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З АВТОНОМНИМ ІНВЕРТОРОМ СТРУМУ

О. В. ВолковЗапорізька державна інженерна академія
просп. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна. E-mail: volkov_av@ukr.net**І. О. Косенко**

ВАТ "Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь». E-mail: sotigor@gmail.com

Виконано дослідження впливу зміни параметрів елементів (ємності конденсаторів, активних опорів статора двигуна і демпфуючих резисторів, встановлених на вході активного випрямляча) силової схеми асинхронного електроприводу з автономним інвертором струму й активним випрямлячем струму на працездатність, швидкість та енергетичні показники прогнозуючого керування в сталих і динамічних режимах цього електроприводу.

Ключові слова: асинхронний електропривод, автономний інвертор струму.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последние годы для частотно-регулируемых электроприводов (ЭП) получило широкое распространение прогнозирующее векторное управление [1–5]. Особый интерес представляет применение данного управления к новым типам частотно-регулируемых ЭП и, в частности, к асинхронным ЭП (АЭП), выполненным на основе автономного инвертора тока (АИТ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1–5]. В настоящее время применительно к данным АЭП получили распространение два способа прогнозирующего управления, основанных на использовании информации о конечном значении прогнозирующего вектора [1] или о направлении изменения этого вектора [2–5]. При этом последний способ прогнозирующего управления (по сравнению с первым) является более предпочтительным, поскольку характеризуется относительной простотой технической реализации (т.к. математические выражения для осуществления прогнозирования содержат меньше составляющих и не содержат параметры элементов силовой цепи) [2–5].

Целью работы является исследование влияния изменения параметров элементов силовой цепи на работоспособность системы прогнозирующего управления, на качество регулирования и энергетические показатели АЭП с АИТ–ШИМ.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. На рис. 1 представлена функциональная схема АЭП с АИТ–ШИМ, содержащая: сетевой фильтр СФ, состоящий из реакторов L_ϕ , конденсаторов C_κ и демпфирующих резисторов R_κ ; активный выпрямитель тока АВТ (выполненный на запираемых тири-

сторах $V1–V6$) с системой прогнозирующего релейно-векторного управления ПРВУ1; сглаживающий дроссель L_d ; автономный инвертор тока АИТ (выполненный на запираемых ключах со схемой, идентичной АВТ) с системой прогнозирующего релейно-векторного управления ПРВУ2; блок конденсаторов C_{II} ; блоки датчиков фазных токов БДТ1, БДТ2 и напряжений БДН1, БДН2; датчик тока выпрямителя ДТВ; асинхронный двигатель АД. Функционирование прогнозирующих систем ПРВУ1 и ПРВУ2 подробно рассмотрено в работах [4] и [2, 3, 5] соответственно. При этом ПРВУ2 может быть выполнена в двух вариантах: с прогнозирующими частотно-токовым (ЧТУ) из [2] и частотно-напряженческим (ЧНУ) управлением из [3].

На первом этапе выполним расчет годографов обобщенных векторов приращений статорных тока $\Delta \bar{I}_s$ и напряжения $\Delta \bar{U}_s$, сетевого тока $\Delta \bar{I}_\phi$ АЭП на произвольном межкоммутационном интервале силовых ключей АВТ и АИТ из следующих уточненных зависимостей [2–5]:

$$\Delta \bar{I}_s = K_1 \bar{I}(0) + (K_2 - 1) \bar{I}_s(0) + K_3 \bar{U}_s(0) + K_4 \bar{E}_r(0); \quad (1)$$

$$\Delta \bar{U}_s = K_1' \bar{I}(0) + K_2' \bar{I}_s(0) + (K_3' - 1) \bar{U}_s(0) + K_4' \bar{E}_r(0); \quad (2)$$

$$\Delta \bar{I}_\phi = q_1 \bar{I}_n(0) + \bar{I}_\phi(0)(q_2 - 1) + q_3 \bar{U}_\kappa(0) + q_4 \bar{U}_\phi(0), \quad (3)$$

где $\bar{I}(0)$, $\bar{U}_s(0)$, $\bar{I}_s(0)$ и $\bar{E}_r(0)$ – начальные значения обобщенных векторов соответственно выходного тока АИТ, статорных напряжения, тока и ЭДС ротора АД; $\bar{I}_n(0)$, $\bar{I}_\phi(0)$, $\bar{U}_\kappa(0)$, $\bar{U}_\phi(0)$ – начальные значения обобщенных векторов соответственно входного тока выпрямителя, сетевого тока АЭП,

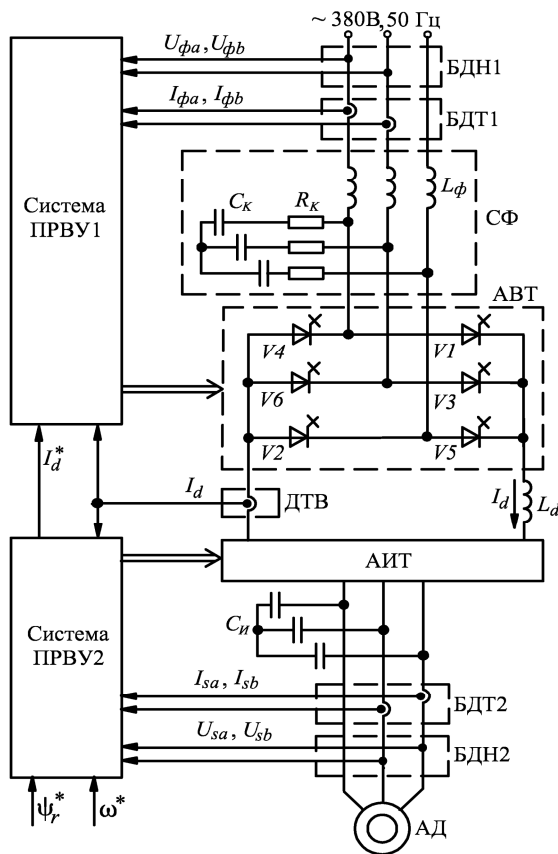


Рисунок 1 – Функциональная схема АЭП с АИТ–ШИМ и АВТ

напряжения на конденсаторах C_k и сетевого напряжения; $K_1 - K_4$, $K'_1 - K'_4$ и $q_1 - q_4$ – весовые коэффициенты, зависящие от продолжительности времени прогнозирования и текущих значений параметров элементов силовой цепи [2–5]. При этом под начальными значениями векторов понимаются значения этих векторов в начале текущего межкоммутационного интервала.

Причем коэффициенты $K_1 - K_4$ и $K'_1 - K'_4$ зависят от значений емкости конденсаторов $C_н$ и активного сопротивления R_s статорных обмоток двигателя, а коэффициенты $q_1 - q_4$ – от емкости конденсаторов C_k и активных сопротивлений фильтра R_k [2–5].

На рис. 2 представлен расчет упомянутых годографов, выполненный в полярной координатной системе “ $\alpha - \beta$ ” для номинальных и измененных (в 1,5 раза – для активных сопротивлений и в (0,95–1,05) раза для емкостей) значений параметров элементов силовой цепи АЭП.

Из анализа полученных результатов при расчете годографов установлено:

– годограф вектора приращения статорного тока (с помощью которого реализуется прогнозирующее ЧТУ) значительно зависит от значения активного сопротивления статорной цепи АД и практически не зависит от изменения значения емкости конденсаторов $C_н$ (годограф, полученный при изменении данной емкости совпадает с кривой 2);

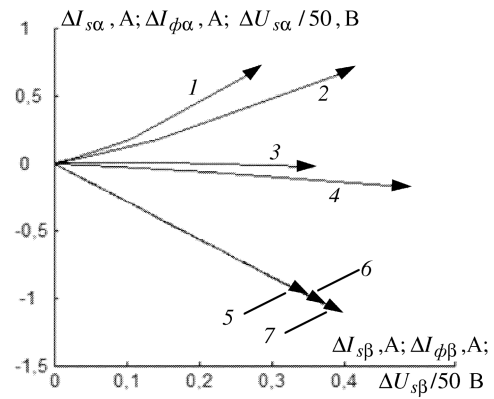


Рисунок 2 – Годографы движения векторов приращений статорных тока (1 и 2) и напряжения (5–7), сетевого тока АЭП (3 и 4) при следующих значениях параметров силовой цепи: 1 – для $1,5 R_s$; 2 – для R_s ; 3 – для R_k ; 4 – для $1,5 R_k$; 5 – для $1,05 C_н$; 6 – для $C_н$; 7 – для $0,95 C_н$

– годограф вектора приращения статорного напряжения (с помощью которого реализуется прогнозирующее ЧНУ) зависит от изменения значения емкости конденсаторов $C_н$ и практически не зависит от изменения активного сопротивления статорной цепи (годограф, полученный при изменении сопротивления R_s , совпадает с кривыми 5–7);

– годограф вектора приращения сетевого тока существенно зависит от значения активного сопротивления сетевого фильтра и практически не зависит от изменения значения емкости конденсаторов C_k (полученный при изменении емкости годограф совпадает с кривой 3).

Применительно к прогнозирующему ЧНУ, следует отметить, что изменение значения емкости конденсаторов $C_н$ влияет лишь на изменение амплитуды вектора приращения статорного напряжения и не вносит погрешности в нахождение его фазового угла. С учетом того, что функционирование указанной системы ЧНУ основано на использовании информации только об аргументе прогнозирующего вектора [5], можно сделать вывод, что данная система прогнозирующего управления является инвариантной по отношению к изменению внутренних параметров силовой цепи АЭП с АИТ–ШИМ.

На втором этапе с помощью разработанной имитационной модели АЭП с АИТ–ШИМ и АВТ выполнена для номинальных и измененных (в 1,5 раза для активных сопротивлений) значений параметров элементов силовой цепи оценка работоспособности АЭП с АИТ–ШИМ при прогнозирующем управлении, а также качественная оценка полученного регулирования и количественная оценка энергетических показателей.

На рис. 3 приведен график, иллюстрирующий достигнутое быстродействие при обработке двукратного значения активной составляющей вектора статорного тока (которое, как видно, практически не изменяется при изменении упомянутых активных сопротивлений и составляет 6 мс).

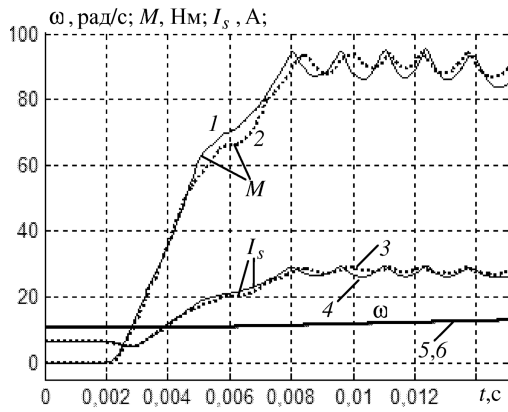


Рисунок 3 – Электромеханические процессы обработки двукратного (от номинального) задания на активную проекцию вектора статорного тока (2, 3, 5 – для $1,5 R_s$ и $1,5 R_k$ и 1, 4, 6 – для R_s и R_k)

На рис. 4 представлены рассчитанные электро-механические процессы АЭП с АИТ–ШИМ и АВТ в следующих режимах его работы: разгона до номинальной скорости двигателя, наброса и последующего сброса номинального момента нагрузки, реверса до половинного значения номинальной скорости АД и останова. Данные процессы получены при увеличенных в 1,5 раза значениях (от номинальных) активных сопротивлений статора АД и сетевого фильтра. При этом отклонение мгновенных значений электро-механических процессов от рассчитанных при номинальных значениях упомянутых активных сопротивлений составляет по скорости и модулю вектора потокоцепления ротора – менее 0,5 %, а по модулю вектора статорного тока и электромагнитному моменту – не более 5 %.

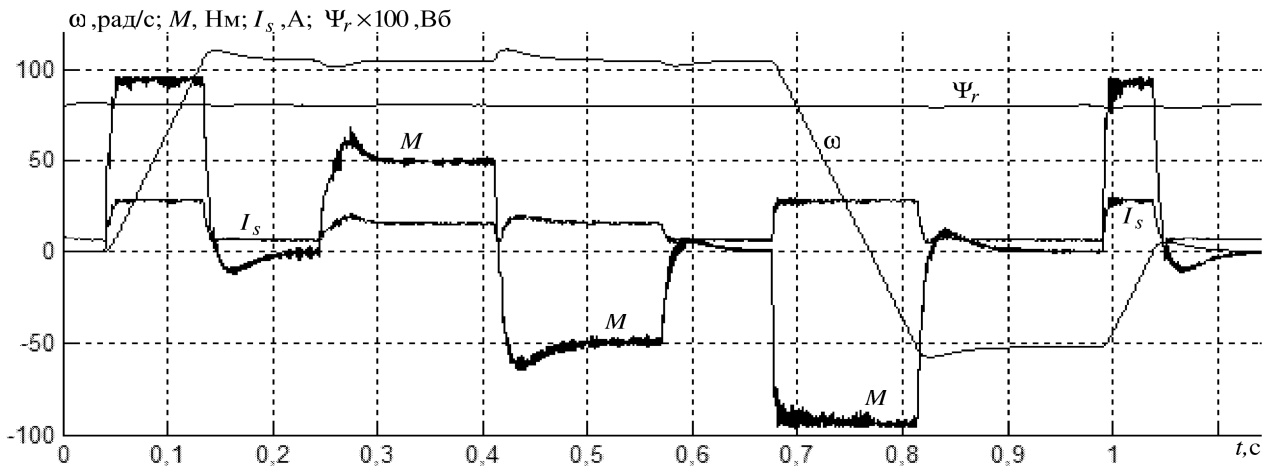


Рисунок 4 – Электромеханические процессы АЭП с АИТ–ШИМ и АВТ

В табл. 1, 2 представлены рассчитанные значения энергетических показателей соответственно при изменении активных сопротивлений статора АД и сетевого фильтра.

Таблица 1 – Энергетические показатели АЭП при изменении активного сопротивления статора АД

ω , рад/с	M_c , Нм	Значение R_s	$K_{Г1}$, %	$K_{П}$, %	$f_{АИТ}$, Гц
$\omega = \omega_n$	$M_c = M_n$	R_s	2,09	5,57	1030
		$1,5 R_s$	2,00	4,9	1050
	$M_c = -M_n$	R_s	5,2	7,7	780
		$1,5 R_s$	4,9	7,9	850
$\omega = \frac{\omega_n}{10}$	$M_c = M_n$	R_s	3,57	5,44	920
		$1,5 R_s$	3,4	5,5	900
	$M_c = -M_n$	R_s	4,8	5,78	780
		$1,5 R_s$	4,1	5,4	850

Из анализа результатов, показанных в данных табл. 1, 2, следует, что изменение активных сопротивлений статора АД и сетевого фильтра практически не влияет на качество регулирования векторов статорного и сетевого токов.

Таблица 2 – Энергетические показатели АЭП при изменении активного сопротивления в СФ

ω , рад/с	M_c , Нм	Значение R_k	$K_{Г2}$, %	K_M , о.е.	$K_{П}$, %	$f_{АВТ}$, Гц
$\omega = \omega_n$	$M_c = M_n$	R_k	3,57	0,999	4,08	4900
		$1,5 R_k$	3,3	0,999	3,9	4950
	$M_c = -M_n$	R_k	8,06	-0,995	4,4	4800
		$1,5 R_k$	8,5	-0,994	4,5	5000
$\omega = \frac{\omega_n}{10}$	$M_c = M_n$	R_k	17,79	0,979	2,7	5100
		$1,5 R_k$	16,5	0,978	2,6	5100
	$M_c = -M_n$	R_k	39,3	0,912	2,2	5050
		$1,5 R_k$	31,5	0,931	2,1	5100

Разработанная имитационная модель характеризуется следующими параметрами силовой цепи: двигателем типа 4А132S6У3 мощностью 5,5 кВт; сглаживающим реактором с индуктивностью $L_d = 75$ мГн; конденсаторами $C_{П} = C_k = 50$ мкФ; резисторами $R_k = 1$ Ом.

На рис. 2–4 и в табл. 1–2 приняты следующие обозначения: $\Delta I_{s\alpha}, \Delta I_{s\beta}, \Delta U_{s\alpha}, \Delta U_{s\beta}$ и $\Delta I_{\phi\alpha}, \Delta I_{\phi\beta}$ – проекции на оси неподвижной орто-

гональной системы координат “ $\alpha - \beta$ ” обобщенных векторов приращений статорных тока и напряжения двигателя, сетевого тока АЭП соответственно; ω и ω_n – фактическое и номинальное значения скорости АД; M и M_n – фактическое и номинальное значения электромагнитного момента двигателя; Ψ_r и I_s – модули обобщенных векторов потокосцепления ротора и статорного тока АД соответственно; $K_{Г1}$ и $K_{Г2}$ – коэффициенты гармонических искажений для фазных статорного и сетевого токов; $K_{П}$ – коэффициент пульсаций выпрямленного тока; $f_{АВТ}$ и $f_{АИТ}$ – частота переключения силовых ключей АВТ и АИТ соответственно; K_M – сетевой коэффициент мощности АЭП.

ВЫВОДЫ. Уход значений активных сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов в силовой схеме АЭП с АИТ–ШИМ, обусловленный изменением теплового режима её работы, не влияет на работоспособность рассматриваемых систем прогнозирующего управления. При этом обеспечивается практически равноценное высокое качество регулирования координат и энергетических показателей АЭП с АИТ–ШИМ и АВТ (которое достигается при номинальных значения упомянутых варьируемых параметров).

INVESTIGATION OF PREDICTIVE CONTROL FEATURES FOR INDUCTION DRIVE WITH CURRENT SOURCE INVERTER

A. Volkov

Zaporozhye State Engineering Academy

prosp. Lenina, 226, Zaporozhye, 69006, Ukraine. E-mail: volkov_av@ukr.net

I. Kosenko

Zaporizhstal Integrated Iron & Steel Works JSC. E-mail: sotigor@gmail.com

The effect of influences of parameters of elements (capacitors, the resistance of the active motor stator and damping resistors, installed at the entrance of the active rectifier) of power circuit asynchronous electric drive with an autonomous inverter current and active rectifier of a current to the availability, performance and energy performance of predictive control in set and dynamic modes of the electric drive is investigation.

Key words: induction drive, current source inverter.

REFERENCES

1. Shreiner R.T., Efimov A.A., Mukhamatshin I.A. Predictive relay-vector control of active current converters of frequency in power supply systems and electric drive systems // *AC Drives: Proceedings of the XIII International Scientific-Technical Conf.* – Yekaterinburg: Ural State Technical University. – 2005. – PP. 137–140. [in Russian]
2. Volkov A.V., Kosenko I.A. The induction drive based on current source inverter with pulse-width modulation // *Technical Electrodynamics. Them. rel.: Problems of modern electrical equipment.* – K. – 2008. – Part 1. – PP. 81–86. [in Russian]
3. Volkov A.V., Kosenko I.A. Predicting relay-vector regulation in induction drives with the current source inverter // *The Messenger KSPU.* – Kremenchuk. – 2008. – № 3. – PP. 98–102. [in Russian]

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Мухаматшин И.А. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями частоты в системах электроснабжения и электропривода // *Электроприводы переменного тока: Труды Международной XIII научно-технической конф.* – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. – 2005. – С. 137–140.
2. Волков А.В., Косенко И.А. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки».* – К., 2008. – Ч. 1. – С. 81–86.
3. Волков А.В., Косенко И.А. Прогнозирующее релейно-векторное регулирование в асинхронных электроприводах с инвертором тока // *Вісник КДПУ.* – Кременчук, 2008. – № 3. – С. 98–102.
4. Волков А.В., Косенко И.А. Совершенствование прогнозирующего релейно-векторного управления активным выпрямителем тока в асинхронном электроприводе с автономным инвертором тока // *Технічна електродинаміка.* – 2010. – № 6. – С. 24–34.
5. Косенко И.А. Асинхронный электропривод с автономным инвертором тока и усовершенствованным управлением // *Вестник Киевского национального университета технологий и дизайна. Тем. вып.: Энергоэффективность. Проблемы в силовой электронике и электротехнике.* – К.: КНУТД, 2012. – № 1 (63). – С. 16–21.

Стаття надійшла 17.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Кореньковою Т.В.