

ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

И.В. Волков, чл.-корр. НАН Украины, **В.А. Войтех**, канд. техн. наук, **А.П. Плугатарь**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
e-mail: 8dep.ied@ied.org.ua

Получены параметрические преобразователи для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, за счет которых происходит ограничение пускового тока в обмотках двигателя без искажения гармонического состава потребляемого из сети тока с одновременной компенсацией реактивной мощности, построены математическая модель и макетный образец, проведены математические и физические эксперименты, выполнен анализ полученных результатов, сделаны выводы. Библиография: 3, рис. 5, таблица.

Ключевые слова: параметрический преобразователь, источник тока, асинхронный двигатель, высшие гармоники, реактивная мощность, пусковое устройство.

В Украине более 80 % общепромышленных асинхронных двигателей работают без преобразователей частоты, и проблема пуска для них весьма актуальна. При прямом подключении к сети пусковые токи, как известно, могут достигать пяти-семикратных значений от номинального, что при больших моментах инерции и сопротивлениях нагрузки вызывает перегрузку питающей сети и может привести к перегреву двигателя и, как следствие, – к уменьшению его срока службы или даже выходу из строя.

Для уменьшения пусковых токов в настоящее время обычно применяют тиристорные пускатели Soft Start (устройства «мягкого» пуска), которые за счет изменения угла отпирания тиристорov (симисторov) обеспечивают изменение среднего значения подводимого к статору двигателя напряжения, а следовательно, уменьшение пускового тока статора и момента двигателя. При этом из сети потребляется несинусоидальный ток, что приводит к широкому спектру помех, оказывающих негативное влияние как на питающую сеть, так и на параллельно работающее электронное оборудование, в частности, и на контроллеры плавного пуска [3].

Другим, универсальным, способом пуска является питание двигателя от преобразователя частоты. В этом случае можно обеспечить необходимый пусковой момент и время разгона двигателя, а также регулирование скорости вращения в широком диапазоне. Однако этот способ значительно повышает (в 2-3 раза) стоимость оборудования и при отсутствии необходимости регулирования скорости вращения двигателя применяется редко.

В то время как преобразователи частоты комплектуются фильтрами сетевых гармоник тока и фильтрами высокочастотных электромагнитных помех, тиристорные пускатели такими фильтрами не снабжаются, и их влияние на сеть и параллельно работающее оборудование является существенным и мало изученным.

Альтернативным вариантом является применение разработанных в Институте электродинамики НАН Украины параметрических пускателей Velvet Start (устройства «бархатного» пуска). Принцип их действия основан на использовании свойств некоторых сочетаний реактивных элементов, способных (при соответствующих соотношениях между собственной резонансной частотой и частотой напряжения питающей сети) формировать заданные вольт-амперные характеристики на входе и выходе. Эти принципы, соответствующие схемы, характеристики и формулы наиболее полно изложены в работах [1, 2].

Структурно они представляют собой шестиполюсники с тремя входными полюсами, подключенными к трехфазной сети, и тремя выходными полюсами, подключаемыми к статору асинхронного двигателя. Схема шестиполюсника содержит лишь реактивные элементы – дроссели (реакторы) и конденсаторы, которые могут быть соединены между собой различ-

ными способами, но с обязательным выполнением определенного соотношения между их индуктивными и емкостными сопротивлениями.

Такие схемы известны как схемы Штейнметца и Бушера (без взаимоиндуктивной связи M), либо как индуктивно-емкостные преобразователи ИЕП (при наличии M). При выборе реактивных элементов, исходя из условий резонанса на частоте напряжения питающей сети ($\omega^2 LC = k = 1$), эти схемы ведут себя как источники тока, т.е. ток в нагрузке остается неизменным при любом сопротивлении нагрузки, включая режим короткого замыкания, а напряжение на нагрузке изменяется пропорционально нагрузочному сопротивлению. Если же реактивные элементы выбраны из условия резонанса на двойной либо половинной частоте питающей сети (в зависимости от выбранной M), то эти же схемы при изменении нагрузки стабилизируют ток, потребляемый из сети. При промежуточной настройке реактивных элементов внешние вольт-амперные характеристики этих схем (т.е. зависимости напряжения на нагрузке от тока нагрузки) имеют вид, показанный на рис. 1. На этом рисунке токи и напряжения на выходе схемы даны в относительных единицах (по отношению к току короткого замыкания и напряжению холостого хода соответственно) для различных k , изменяющихся от 1 до 0, т.е. при резонансной и отличных от резонансной настройке элементов.

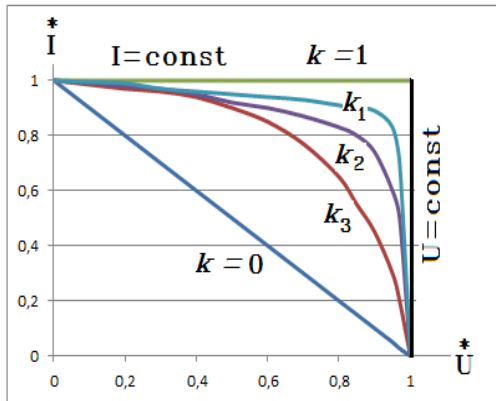


Рис. 1

Включение между сетью и статором двигателя такого параметрического преобразователя позволяет отойти от традиционного питания двигателя при постоянстве подводимого к нему напряжения, ибо это напряжение будет определяться той кривой, которую мы выбрали, задавая нужный параметр k , а абсолютное значение тока статора будет зависеть от того базового значения тока короткого замыкания, которое определяется выбранным значением индуктивности реактора L .

Включение между сетью и статором двигателя такого параметрического преобразователя позволяет отойти от традиционного питания двигателя при постоянстве подводимого к нему напряжения, ибо это напряжение будет определяться той кривой, которую мы выбрали, задавая нужный параметр k , а абсолютное значение тока статора будет зависеть от того базового значения тока короткого замыкания, которое определяется выбранным значением индуктивности реактора L .

Расчетная электрическая схема пускового устройства представлена на рис. 2, где обозначено: L – индуктивность обмотки одной фазы трехфазного реактора, M – взаимная индуктивность между двумя любыми обмотками, K_c – коэффициент магнитной связи между ними, C – емкость батареи конденсаторов, $Z_H = R_H + jX_H$ – комплексное сопротивление нагрузки, которым в первом приближении эквивалентуруется каждая фаза

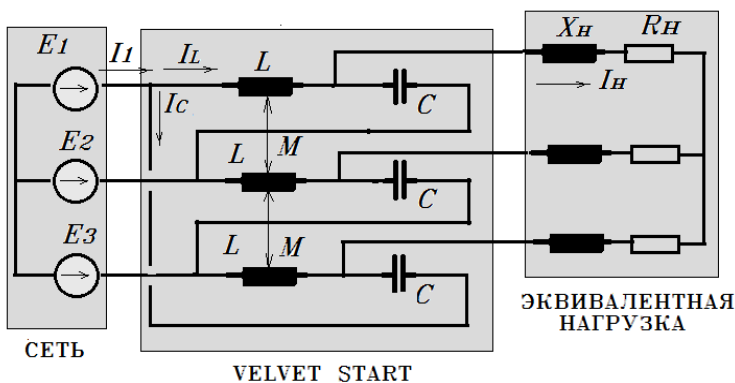


Рис. 2

асинхронного двигателя с КЗ ротором.

В соответствии с методикой, изложенной в работе [2], найдем выражения для тока нагрузки I_n и входного тока фазы A питающей сети:

$$I_n = \frac{E_1(1 - \omega^2 k L C)}{Z_n(1 - \omega^2 k L C) + j\omega K_L}; \quad (1)$$

$$I_1 = J E_1 \omega C (1 - 1/a) + I_n (1 + j\omega C Z_n - a j\omega C), \quad (2)$$

где $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$; $k = 1 + a^2 K_c + a K_c$.

Токи фаз B и C ввиду симметрии схемы будут по модулю такими же, но сдвинутыми соответственно на 240 и 120 эл. град. Входное комплексное сопротивление однофазного эквивалента трехфазной схемы рис. 3 найдем, воспользовавшись выражениями (1) и (2):

$$Z_{ax} = \frac{E_1}{I_1} = \frac{(1 - \frac{\omega^2 kLC}{a})(1 + j\omega CZ_n - aj\omega C)}{(1 - \frac{\omega^2 kLC}{a})(1 + j\omega CZ_n - aj\omega C) + (1 - \omega^2 kLC) + j\omega kL} \quad (3)$$

При выбранных параметрах L, C, Kc входное сопротивление является функцией сопротивления нагрузки $Z_H = Z_{\mathcal{E}} = R_{\mathcal{E}} + jX_{\mathcal{E}}$. Как модуль, так и фазовый угол этого сопротивления изменяются в течение разгона двигателя за счет изменения его активной составляющей $R_{\mathcal{E}}$. При старте, когда скольжение $s=1$, эта составляющая минимальна и обуславливает увеличение пускового тока. При выходе на номинальный режим ($s=s_n$) она максимальна. Индуктивная составляющая при пуске не изменяется.

Модуль входного сопротивления должен удовлетворять двум условиям, соответствующим двум требованиям, предъявляемым к пусковому устройству:

1. Ток, потребляемый из сети при пуске, не должен превышать определенного заданного значения. Условимся, что это значение при пуске через параметрическое пусковое устройство в N раз меньше тока, потребляемого при прямом пуске.

2. Ток, потребляемый из сети в номинальном режиме, должен совпадать по фазе с напряжением питания ($\cos \varphi=1$).

Для удовлетворения первого требования необходимо, чтобы входное сопротивление было в N раз больше, чем при прямом пуске:

$$|Z_{bx}|_{vs} = N |Z_{bx}|_0, \quad s = 1. \quad (4)$$

Для удовлетворения же второго требования необходимо, чтобы в установившемся режиме мнимая часть комплексного сопротивления (импеданса) Z_{bx} равнялась нулю,

$$\text{Im} |Z_{bx}|_{(vs)} = 0, \quad S = S_n. \quad (5)$$

Совместное решение двух уравнений (4), (5) дает возможность найти два определяющих параметра пускового устройства: L и C . Эти значения – приближенные, поскольку мы пользовались рядом упрощений (схема замещения двигателя, не учитывающая ветвь намагничивания, пренебрежение индуктивностью кабеля, идеальное значение коэффициента магнитной связи между обмотками трехфазного реактора $Kc=0,5$ и др.), однако они достаточны в качестве стартовых для дальнейшего математического моделирования всей электро-механической системы и ее оптимизации с учетом отмеченных факторов и особенностей нагрузки электропривода. На рис. 3 представлена расчетная схема программы в среде Simulink для моделирования пуска асинхронного двигателя от Velvet Start.

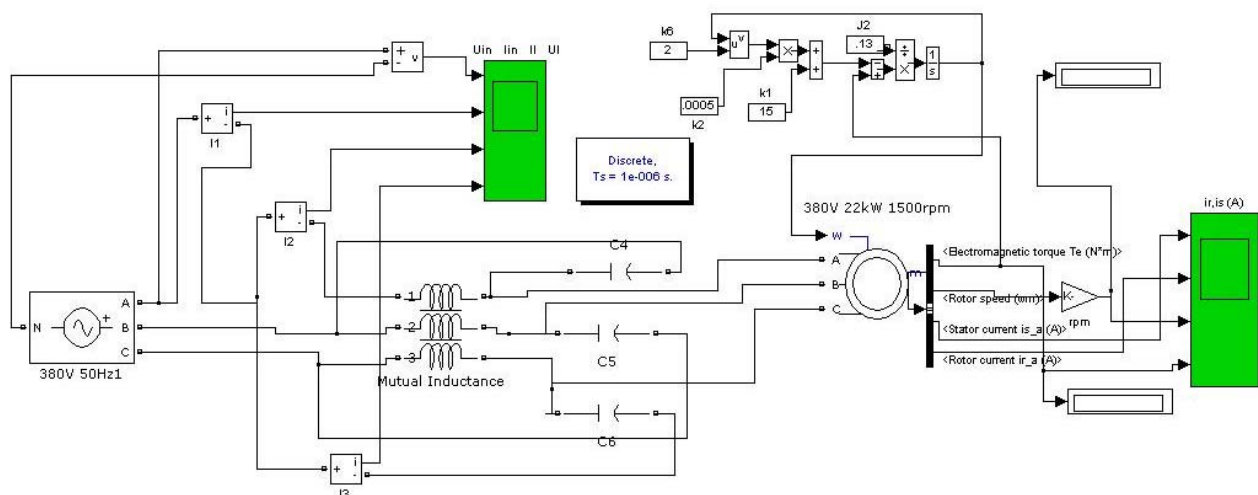


Рис. 3

Ниже представлены расчетные временные диаграммы момента, скорости и тока статора и ротора асинхронного двигателя 7AVER160M2ie1Y3 со следующими номинальными данными: $P_n=18,5$ кВт; $N_c=3000$ /мин; $M_n=60,3$ Нм, $N_n=2930$ об/мин, $I_n=34,5$ А при пуске от сети (рис. 4) и от устройства плавного пуска Velvet Start (рис. 5).

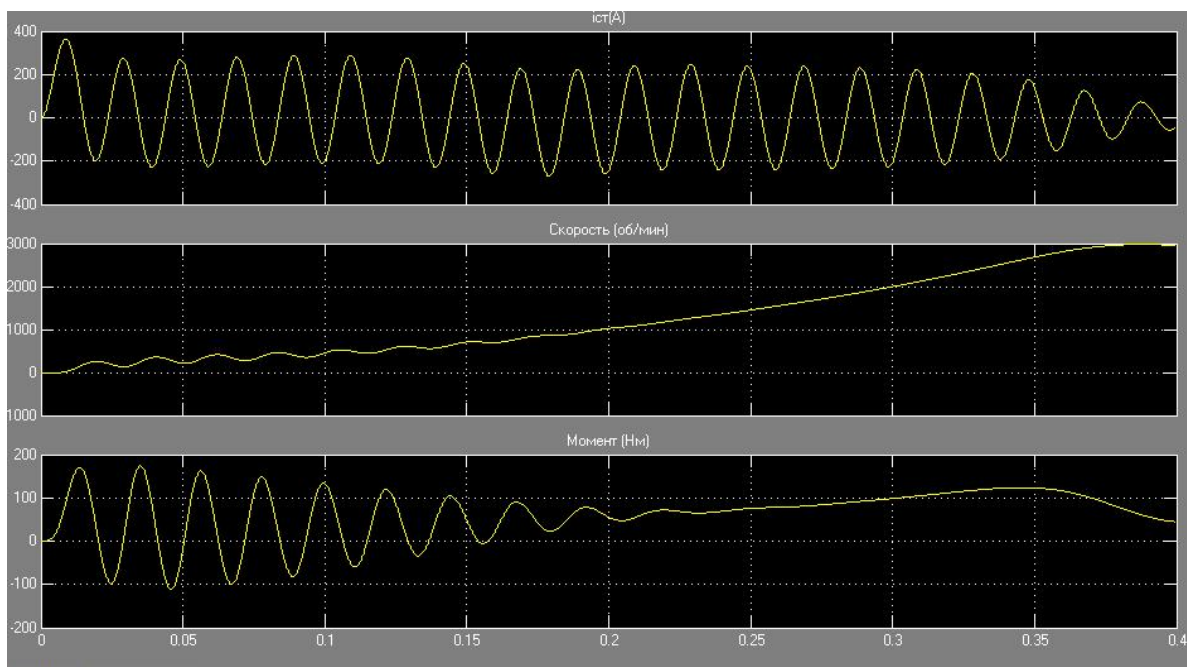


Рис. 4

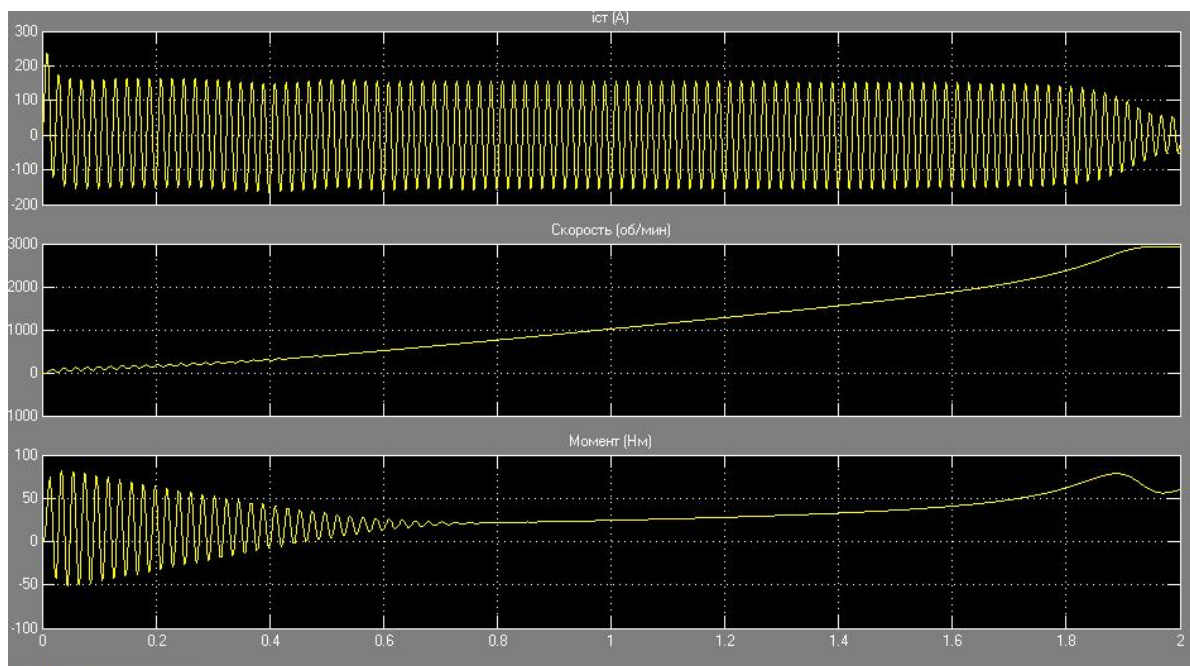


Рис. 5

Из рисунков видно, что устройство «бархатного» пуска обеспечивает уменьшение пускового тока вдвое (с 5 до 2,5-кратного значения), и как следствие, увеличение времени пуска с 0,4 до 1,9 с.

Экспериментальный образец пускового устройства Velvet Start прошел испытания с двигателем 7AVER160M2ie1Y3 (18,5 кВт) на испытательной базе ОАО "НИПТИЭМ" г. Владимир (Россия).

В таблице представлены экспериментальные данные испытаний при номинальной мощности на валу двигателя при прямом пуске и пуске от Velvet Start с параметрами $L=2,2$ мН, $K_c=0,4$, $C=100$ мкФ.

Пусковое устройство	P2, кВт	I1, А	P1, кВт	S, %	M, Нм	cos φ	КПД, %
Прямой пуск	18,5	34	19,99	2,02	60,11	0,894	92,54
Velvet Start	18,5	30,45	19,96	1,99	60,09	0,996	92,66

где обозначено: P2 – мощность на валу двигателя; I1 – ток статора; P1 – мощность, потребляемая из сети; S – скольжение; M – момент на валу; cos φ – коэффициент мощности, потребляемой из сети; КПД – коэффициент полезного действия.

Результаты испытаний экспериментального образца Velvet Start показали соответствие расчетных и экспериментальных данных для пусковых и рабочих характеристик.

Из результатов испытаний видно, что Velvet Start не ухудшает рабочие характеристики двигателя, более того, он позволяет повысить cosφ практически до единицы. КПД двигателя также несколько увеличивается, особенно при малых нагрузках. Так, при P2=6,5 кВт он равен 86 % при прямом подключении и 92 % – при использовании Velvet Start.

Выводы. Разработанные пусковые устройства Velvet Start можно рассматривать как альтернативные широко используемым устройствам Soft Start благодаря следующим их преимуществам: простоте конструкции; умеренной стоимости; высокой надежности; отсутствию генерации высших гармоник и электромагнитных помех; возможности полной компенсации реактивной мощности в рабочих режимах; возможности работы в режиме короткого замыкания до преодоления момента сухого трения.

1. Волков И.В., Исаков В.Н. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.
2. Милых А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наук. думка, 1974. – 216 с.
3. Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б. Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 31–33.

УДК 621.311.001.51

І.В. Волков, чл.-кор. НАН України, **В.О. Войтех**, канд. техн. наук, **О.П. Плугатар**, канд. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Пуск асинхронних двигунів з використанням параметричних перетворювачів

Отримано параметричні перетворювачі для пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, за рахунок яких відбувається обмеження пускового струму в обмотках двигуна без спотворення гармонічного складу споживаного з мережі струму з одночасною компенсацією реактивної потужності, побудовано математичну модель та макетний зразок, проведено математичні та фізичні експерименти, виконано аналіз отриманих результатів, зроблено висновки. Бібл. 3, рис. 5, таблиця.

Ключові слова: параметричний перетворювач, джерело струму, асинхронний двигун, вищі гармоніки, реактивна потужність, пусковий пристрій.

I.V. Volkov, V.A. Voitekh, A.P. Plugatar

Institute of Electrodynamics National Academy of science of Ukraine,
 Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Induction motors start with parametric converters using

Parametric converters for starting induction motors with squirrel cage have obtained. The motor windings starting current limitation without consumed current harmonic distortion from the grid with simultaneous compensation of reactive power have provided. The MATLAB mathematical model and the model sample have produced, mathematical and physical experiments have performed, findings have analyzed and conclusions have formulated. References 3, figures 5, table.

Key words: parametric converters, current source, induction motor, high harmonics, reactive power, starting device.

Надійшла 10.09.2013
 Received 10.09.2013