

Посвящается светлой памяти известных специалистов в области преобразовательной техники и электропривода, профессоров: Лабунцова Владимира Александровича, Обухова Станислава Григорьевича и Исакова Владимира Николаевича

## Устройство для равноускоренного пуска асинхронных электромеханических систем

КАЛЮЖНЫЙ В.В., КАЛЮЖНЫЙ С.В.

Описывается оригинальная схема устройства для плавного пуска мощных асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Устройство, выполненное на базе одного токопараметрического вентильного преобразователя, обладает предельной простотой, высокой надежностью и качественными энергетическими показателями. Приводятся результаты моделирования в среде Matlab/Simulink и осциллограммы промышленных испытаний.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электромеханическая система пуска, токопараметрический вентильный преобразователь, параметрический источник тока

На практике часто приходится сталкиваться с проблемой надежного пуска мощных электромеханических систем (ЭМС) на базе асинхронных двигателей с фазным ротором, которые имеют большие значения приведенных к валу моментов инерции и статических нагрузочных моментов, особенно принимающих непредсказуемые значения на интервале разгона приводного двигателя. К таким ЭМС относятся: молотковые дробилки, шаровые мельницы, центрифуги, шахтные подъемные машины, поршневые компрессорные установки и т.п.

Ниже приводится техническое описание проверенного экспериментально устройства для плавного (равноускоренного) пуска молотковых дробилок типа ДМ 1500×1500, установленных в углеподготовительном цехе коксохимического завода и снабженных асинхронными двигателями типа АК4-450-6УЗ, 630 кВт, 980 об/мин (статор 6 кВ, 74 А; ротор 680 В, 570 А). Молотковые дробилки каменного угля работают с большими значениями резкопеременных нагрузочных моментов, а также моментов инерции. Пуск их в работу с помощью тиристорно-резисторных роторных станций типа УПТФ проблематичен по причине возможного «зависания» привода на отдельных ступенях пускового сопротивления и, как следствие, токовых перегрузок двигателя и тиристорной роторной станции. Кроме того, при переключении ступеней пускового сопротивления, находящегося в цепи постоянного тока роторного тиристорного моста, наблюдаются значительные броски момента, отрицательно влияющие на срок службы механического оборудования дробилки.

Для повышения надежности пуска молотковых дробилок было предложено [1, 2] оригинальное

устройство (рис. 1), основанное на принципе двойного питания асинхронной машины с фазным ротором [3]. Со стороны статора машина получает питание от источника напряжения (сеть 6 кВ, 50 Гц), а со стороны ротора – от источника стабилизированного переменного тока, выполненного на базе диодного инвертора, ведомого машиной, и

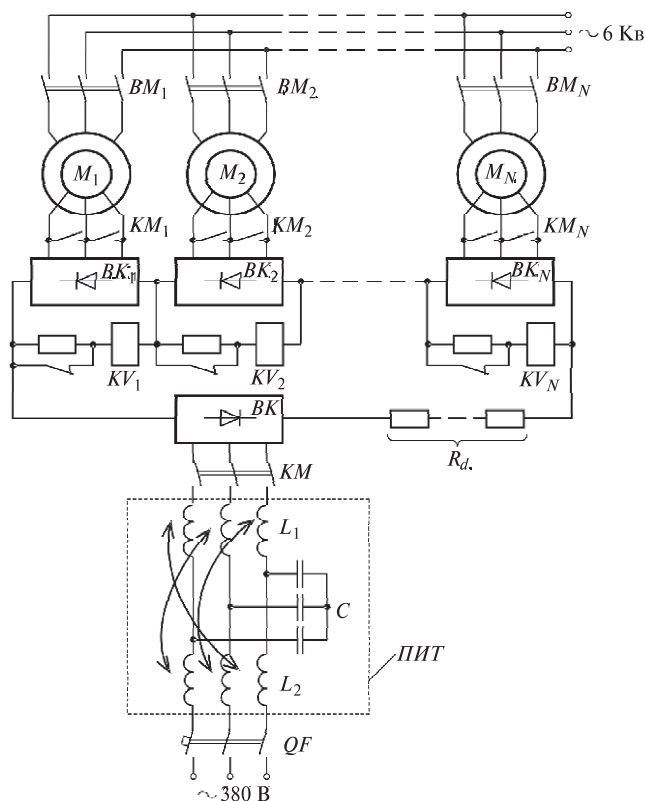


Рис. 1. Силловая схема устройства для равноускоренного пуска и асинхронных ЭМС

нерегулируемого токопараметрического вентильного преобразователя (ТПВП) [4].

Схему на рис. 1 выгодно использовать для очередного пуска  $N$ -го числа двигателей, что позволяет существенно уменьшить финансовые затраты на электрооборудование, а очевидная схемотехническая простота пускового устройства способствует уменьшению затрат на наладку и текущее обслуживание. После завершения пуска необходимого числа, например, молотковых дробилок устройство переводят в режим компенсации реактивной мощности, потребляемой цехом.

На схеме обозначены приводные асинхронные электродвигатели  $M_1, M_2, \dots, M_N$ , обмотки статоров которых подключаются к высоковольтной сети 6 кВ с помощью масляных выключателей  $BM_1, BM_2, \dots, BM_N$ , а обмотки роторов — к диодным вентильным комплектам  $BK_1, BK_2, \dots, BK_N$ , параллельно которым подключены через собственный форсирующий контакт катушки реле  $KV_1, KV_2, \dots, KV_N$  роторных ЭДС соответствующих двигателей. Три фазы ротора каждого двигателя соединяются с силовыми контактами контакторов  $KM_1, KM_2, \dots, KM_N$  при их включении после завершения пуска. Роторные диодные вентильные комплекты  $BK_1, BK_2, \dots, BK_N$  подключены согласно-последовательно друг к другу, а также к диодному выпрямителю  $BK$  параметрического источника тока (ПИТ) и энергопоглощающему сопротивлению  $R_d$ . За счет падения напряжения на этом сопротивлении обеспечивается принудительная коммутация диодов роторных вентильных комплектов при их работе в режиме инверторов, ведомых машиной, на интервале разгона двигателей.

Параметрический источник тока построен по Т-образной схеме и содержит трехфазный реактор с обмотками  $L_1$  и  $L_2$  на каждом стержне магнитопровода, а также снабжен тремя батареями специальных косинусных конденсаторов  $C$ , соединенных по схеме «звезда». Каждая фаза реактора ПИТ имеет разделенную обмотку с коэффициентом связи не менее двух и сдвигом напряжений секций на угол  $120^\circ$ . Часть обмотки реактора  $L_1$ , связанная с выпрямителем  $BK$ , подключается к нему с помощью трехфазного контактора  $KM$  при его замыкании, часть  $L_2$  подключается к сети низкого напряжения, например 380 В, автоматическим выключателем  $QF$ .

Устройство работает следующим образом.

Включают автоматический выключатель  $QF$ . Через часть обмотки реактора  $L_2$  заряжают батареи конденсаторов  $C$  параметрического источника тока. Спустя несколько секунд, включив контактор  $KM$ , подают питание к роторным цепям двигателей  $M_1, M_2, \dots, M_N$ . Питание обеспечивается током,

имеющим неизменное действующее значение, так как ПИТ преобразует систему неизменного напряжения на своем входе в систему неизменного тока на выходе.

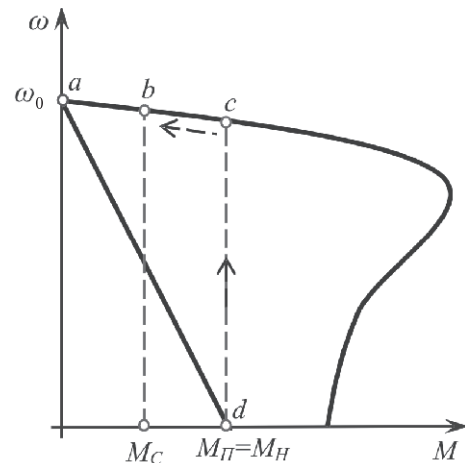


Рис. 2. Траектория пуска ЭМС

Далее включают соответствующий масляный выключатель, например  $BM_1$ , и запускают двигатель  $M_1$ . Пуск двигателя происходит равноускоренно благодаря тому, что в его роторной цепи на всем этапе пуска существует стабилизированный переменный ток, который обеспечивается диодным вентильным комплектом  $BK_1$ , работающим в режиме инвертора, ведомого машиной, т.е. двигателем  $M_1$ .

Равноускоренный пуск с неизменным моментом, равным номинальному (точка  $d$  на рис. 2), положительно влияет на работу механического оборудования и, как известно, всегда является технически оптимальным по времени. В начале пуска реле  $KV_1$  роторной ЭДС форсированно включается. В таком состоянии реле остается до выхода двигателя  $M_1$  на его естественную механическую характеристику (точка  $c$  на рис. 2), после чего реле выключается и подает сигнал на срабатывание контактора  $KM_1$ . При включении контактора процесс пуска первого двигателя завершается, а его рабочая точка переходит в точку  $b$  на механической характеристике. Далее становится возможным запуск следующего двигателя, что обеспечивается подключением его статорной обмотки к высоковольтной сети при разомкнутом соответствующем роторном контакторе.

После завершения пуска всех необходимых двигателей переводят устройство в режим повышения коэффициента мощности. Для этого выключают контактор  $KM$ , который отключает выход ПИТ от входа выпрямителя  $BK$ . Вентильные комплекты  $BK_1, BK_2, \dots, BK_N$ , а также коммутирующее и энергопоглощающее сопротивление  $R_d$  выводятся из работы и не потребляют энергию из сети низкого напряжения. Конденсаторные батареи параметри-

ческого источника тока остаются подключенными через  $L_2$  к сети низкого напряжения, поэтому повышают её коэффициент мощности. При достаточно частых пусках двигателей для повышения КПД описываемого пускового устройства вместо сопротивления  $R_d$  может использоваться инвертор, ведомый сетью. Инвертор будет работать достаточно устойчиво (без опрокидывания), так как значение его угла управления  $\beta = \text{const}$ , и может находиться далеко от значения граничного угла инвертирования  $\beta_{гр}$  при соответствующем выборе сети низкого напряжения.

Предлагаемое устройство обеспечивает легко контролируемый автоматически с помощью только реле ЭДС роторов пуск с заданным значением пускового момента любую многодвигательную ЭМС. Равноускоренный пуск, как известно, позволяет наиболее полно использовать электрическую машину по перегрузочной способности, что бывает крайне необходимым при аварийной остановке оборудования и последующем его пуске с полностью загруженным, например, барабаном молотковой дробилки. Если требуется обеспечить режим «щадящего» пуска по тепловой нагрузке машины (при пустом барабане дробилки), желательно принимать значение пускового момента на уровне номинального. Такой пуск повышает срок службы дорогостоящего электрического и особенно меха-

нического оборудования молотковых дробилок за счет автоматического обеспечения безопасной упорной механической характеристики привода.

Для перехода от режима «щадящего» пуска к режиму «форсированного» пуска в схему ПИТ (рис. 1) дополнительно необходимо ввести два силовых переключателя, с помощью которых секционируются обмотки реактора и конденсаторная батарея. После завершения пуска повышается коэффициент мощности ЭМС, что положительно влияет на энергетические показатели функционирования питающей цеховой сети. По предлагаемой схеме может осуществляться реконструкция действующих ЭМС силами электроремонтных служб цеха, так как все работы будут проводиться на низковольтной стороне сети. Для сведения укажем, что в описанной выше схеме ТПВП представляет собой устройство, основанное на совместном использовании ПИТ и диодного силового шестипульсного выпрямителя ВК. Применение ПИТ позволяет стабилизировать выпрямленный ток в роторной цепи того или иного двигателя не за счет воздействия на угол открытия управляемых вентилей — тиристоров (которых в схеме нет), а за счет естественных электромагнитных процессов, протекающих в электрических цепях с обратным противоположным характером реактивных проводимостей, на базе которых и построен ПИТ.

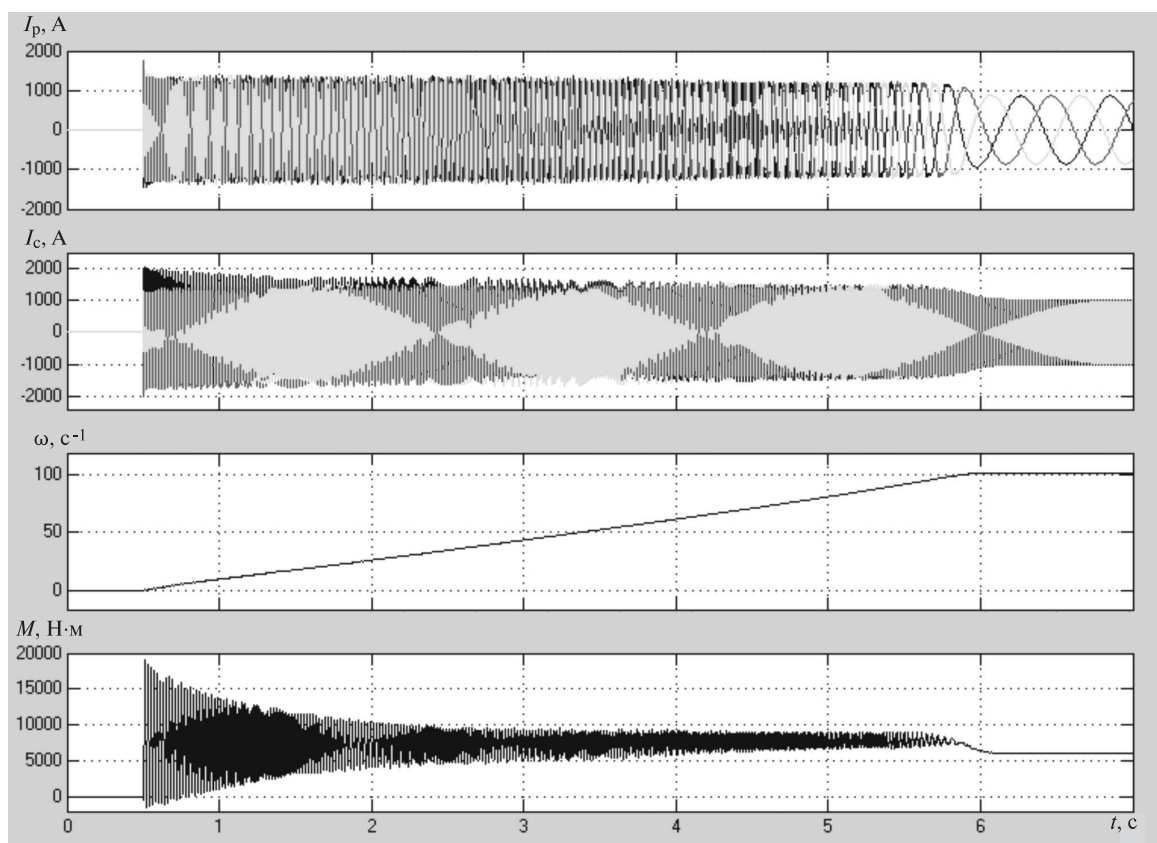


Рис. 3. Временные диаграммы (сверху вниз) токов фаз ротора, токов статора, скорости и момента двигателя

Создается возможность получить на этапе пуска [4]:

постоянно высокий (близкий к единице) коэффициент сдвига  $\cos\varphi_{(1)}$  потребляемого из сети тока по отношению к сетевому высокому напряжению;

малые искажения кривой потребляемого тока; коэффициент искажения  $\nu$ , определяемый как отношение основной гармонической к сумме всех гармонических, включая высшие, достаточно высокий;

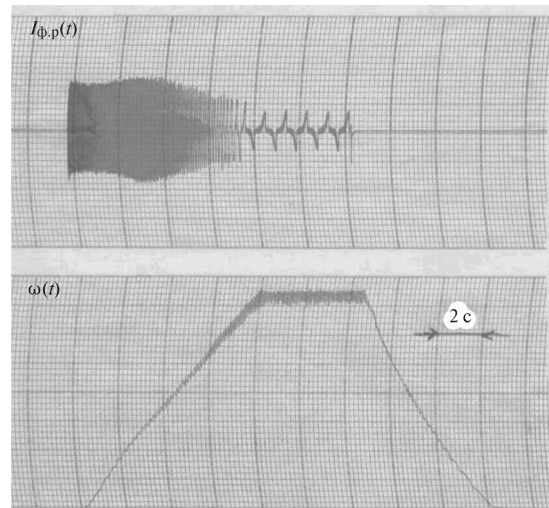
благоприятные условия работы диодных вентилях в схеме (низкие значения производных тока и напряжения).

Равноускоренный пуск ЭМС на базе асинхронного двигателя с ТПВП в роторной цепи наглядно иллюстрируется при компьютерном моделировании электрохимических процессов в системе (рис. 3). Параметры статора двигателя и сети при моделировании приводятся к роторной цепи. Пуск до номинальной скорости  $\omega_n = 102,6 \text{ с}^{-1}$  осуществляется включением контакторов в момент времени  $t=0,5 \text{ с}$  с номинальным нагрузочным моментом  $M_c = M_n = 6,1 \text{ кН}$ .

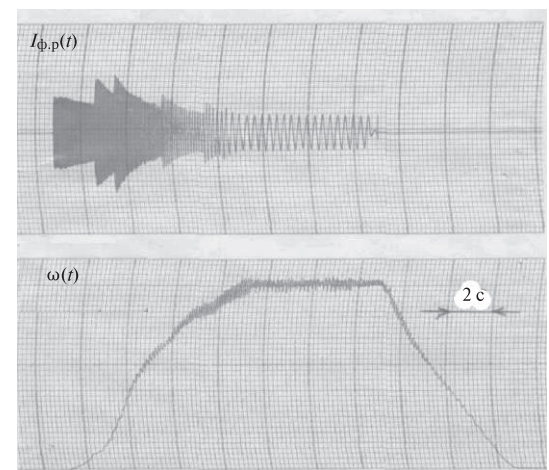
Кроме молотковых дробилок, испытания ЭМС с ТПВП на роторе были проведены на терриконной подъемной машине шахты им. В.В. Вахрушева ГП «Ровенькиантрацит» (Донбасс, Луганская область). Осциллограммы тока фазы ротора и скорости двигателя типа МА36-42/8Ф-У5, 55 кВт, 730 об/мин для режима пуска и торможения выбегом приведены на рис. 4,а. Для сравнения на рис. 4,б показаны осциллограммы работы привода с установленной по проекту на подъемной машине серийной релейно-контакторной роторной станцией.

**Заключение.** Описанные в статье устройства могут быть применены при реконструкции специализированных участков цеха, содержащих несколько мощных двигателей желательного одного и того же типа. В этом случае согласно действующим правилам эксплуатации электроустановок необходимое число косинусных конденсаторов, как правило, уже имеется в цехе, их можно использовать для комплектации ПИТ.

Степень повышения коэффициента мощности зависит от числа работающих двигателей на данном участке цеха. Несложные расчеты показывают, что при наличии на участке цеха четырех асинхронных двигателей мощностью 630 кВт и четырех комплексных конденсаторных установок типа УКБ-0,38-300 УЗ (размеры одной 580×460×2000 мм) можно обеспечить поочередный пуск двигателей с кратностью тока ротора на уровне  $1,7 I_{p,n}$ , используя только две конденсаторные установки. При этом компенсация реактивной мощности, потребляемой из сети четырьмя двигателями, работающими



а)



б)

Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы пуска ЭМС шахтной подъемной машины: а — с ТПВП в цепи ротора; б — с релейно-контакторной роторной станцией

ми с номинальной нагрузкой, с помощью описываемого устройства составит около 50%. Докомпенсацию по реактивной мощности должны взять на себя две другие конденсаторные установки, не задействованные в схеме данного пускового устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1272454 (СССР). Устройство для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором/ И.В. Волков, В.И. Гольцев, В.Н. Исаков, В.В. Калужный, А.П. Плугатарь, Н.Ф. Спикторенко. — БИ, 1986, № 43.
2. Патент Украины № 89030. Пристрій для рівноприскореного пуску і підвищення коефіцієнтів корисної дії та потужності багатодвигунних асинхронних електрохімічних систем/ В.В. Калужний, С.В. Калужний, І.М. Скорих. — БИ, 2009, № 24.
3. Волков И.В., Исаков В.Н. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях. — М.: Радио и связь, 1991, 216 с.
4. Лабунов В.А., Обухов С.Г., Чапыгин Е.Е. и др. Топопараметрические вентиляльные преобразователи. — Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1980, вып. 1(120), с. 3—4.

*Авторы: Калюжный Владимир Владиславович окончил в 1971 г. факультет «Автоматизация производственных процессов» Коммунарского горно-металлургического института (в настоящее время Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск — ДонГТУ). В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка токопараметрических регулируемых вентильных преобразователей для электропривода постоянного тока». Доцент кафедры радиофизики и электроники ДонГТУ.*

*Калюжный Сергей Владимирович окончил в 1997 г. факультет «Автоматизация производственных процессов» ДонГТУ. В 2012 г. в Харьковском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию «Электромеханические системы согласованного вращения с питанием от токопараметрического вентильного преобразователя». Доцент кафедры горной энергомеханики и оборудования ДонГТУ.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 8, pp. 53–57.*

## **A Device for Performing Uniformly Accelerated Startup and Improving the Power Factor of Asynchronous Electromechanical Systems**

**KALYUZHNYI Vladimir Vladislavovich** (*Donbass State Technical University (DonSTU), Lugansk region, Alchevsk*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**KALYUZHNYI Sergei Vladimirovich** (*DonSTU, Lugansk region, Alchevsk*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*An original schematic design of a device for smoothly starting up asynchronous electric motors with a phase rotor winding is described. Made on the basis of a single current-parameter semiconductor-switch converter, this device is extremely simple, highly reliable, and has good power performance indicators. Results of simulation in the Matlab/Simulink environment and oscillograms of industrial tests are presented.*

*Key words: asynchronous motor, electromechanical startup system, current-parameter semiconductor-switch converter, parametric current source*

### REFERENCES

1. **A.s. No. 1272454 (SSSR).** *Ustroistvo dlya puska asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom* (C.a. No. 1272454 (USSR). The device for starting of asynchronous motors with phase rotor)/I.V. Volkov, V.I. Gol'tsev, V.N. Isakov, V.V. Kalyuzhnyi, A.P. Plugatar', N.F. Spiktorenko. Bulletin of inventions, 1986, No. 43.
2. **Patent Ukrainy (Ukraine) No. 89030.** *Pristrii dlya rivnopriskorenogo pusku i pidvishchennya koefitsientiv korisnoi dii ta potuzhnosti bagatodvigunnikh asinkhronnikh elektromekhanichnikh*

*sistem/V.V. Kalyuzhnyi, S.V. Kalyuzhnyi, I.M. Skorikh. Bulletin of inventions, 2009, No. 24.*

3. **Volkov I.V., Isakov V.N.** *Elektroprivody so stabilizirovannym tokom v silovykh tsepyakh* (Electric drives with contact current in power circuits). Moscow, Publ. «Radio and Communications», 1991, 216 p.

4. **Labuntsov V.A., Obukhov S.G., Chaplygin E.E. et al.** *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Preobrazovatel'naya tekhnika — in Russ. (Electrotechnical industry. Converter equipment)*, 1980, iss. 1(120), pp. 3–4.

