

Findings. The efficiency of use of the main dewatering plant of the coal mine as an efficient controllable load has been substantiated. The technological conditions allowing us to improve the energy efficiency of the coal mine pumping in the process of regulation of electricity consumption modes have been defined. The analysis of the technological parameters of the acting main dewatering plant has been done.

Originality. The method for determining the settler pond volume of the main dewatering plant of the coal mine, which improves the efficiency of regulation of the electricity consumption modes, has been developed. We have obtained the dependences of the settler pond specific volume per 1 m³ of water inflow on the amount of its branches and condition of their uniformity.

Practical value. The increase of the number of settler pond branches over five results in inessential reduce of its specific volume but significant complication of the technical plan and construction process. We have substantiated the expediency of building equal in volume branches instead of the unequal ones. This reduces the settler pond volume required for purposes of regulation of the electricity consumption modes in the average by 10–15%.

Keywords: *main dewatering plant, controllable load, electricity consumption, energy efficiency, peak load of power system, settler pond, water inflow, coal mine*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ф.П. Шкрабцем. Дата надходження рукопису 30.01.13.

УДК 621. 313. 323

**В.Б. Низимов, д-р. техн. наук, проф.,
С.В. Колычев, канд. техн. наук, доц.,
А.А. Снизко**

Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Украина, e-mail: elm@dstu.dp.ua

ДИНАМИКА ОБЛЕГЧЕННОГО ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

**V.B. Nizimov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
S.V. Kolychev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
A.A. Snighko**

Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, e-mail: elm@dstu.dp.ua

DYNAMICS OF ALLEVIATED STARTUP SYNCHRONOUS MOTORS WITH NONLINEAR CAPACITIVE ENERGY STORAGE

Цель. Исследование динамики пусковых режимов синхронных двигателей с нелинейным емкостным накопителем энергии для приведения во вращение механизмов со значительным моментом статического сопротивления при одновременном ограничении токов статора и пусковой обмотки.

Методика. Для достижения поставленной цели предложен нелинейный емкостной накопитель энергии, параметры которого меняются в функции скольжения, что позволяет компенсировать индуктивность обмотки возбуждения синхронного двигателя, а за счет уменьшения сдвига фаз между векторами э.д.с. и тока, протекающего через эту обмотку, увеличить создаваемый ею электромагнитный момент. Проверка основных теоретических положений выполнена методами численного моделирования. Для исследования влияния нелинейного накопителя энергии были выполнены расчеты пусковых режимов синхронного двигателя по уравнениям Парка-Горева в относительных единицах системы „ x_{ad} “.

Результаты. В результате анализа полученных расчетных зависимостей было установлено, что, по сравнению с пуском с дополнительным резистором кратностью $8R_f$, время пуска двигателя СДСЗ–2000–100 с предложенным нелинейным емкостным накопителем уменьшилось на 20,8% с 1200 эл. с. до 950 эл. с. Момент трогания снизился с 4,8 о.е. до 3 о.е., а средний асинхронный момент возрос с 1,6 о.е. до 2,3 о.е. При этом ток в обмотке возбуждения с подключенным накопителем в начале пуска достиг значения в 6,5 о.е. Среднее значение тока статора снизилось с 6,2 о.е. до 5,8 о.е.

Научная новизна. Научной новизной работы является предложенная конструкция нелинейного емкостного накопителя энергии, параметры которого нелинейно зависят от частоты протекающего по нему тока, и результаты теоретических исследований его влияния на характеристики асинхронного пуска синхронного двигателя.

Практическая значимость. Предложенный нелинейный емкостной накопитель энергии может найти своё применение в составе пусковых устройств для синхронных двигателей приводов ряда промышленных механизмов.

Ключевые слова: *синхронный двигатель, нелинейный емкостной накопитель энергии, облегченный пуск*

Введение. В современной промышленности заметна тенденция к расширению области применения

синхронных двигателей (СД) средних и больших мощностей. Применение таких двигателей, с одной стороны, обеспечивает довольно высокие технико-экономические показатели, а с другой – требует при-

менения новых технических решений для их пуска, особенно для привода механизмов со значительным моментом статического сопротивления (шаровые и стержневые мельницы, дробилки, скребковые конвейеры). Значительные электродинамические и токовые нагрузки статорной и пусковой обмоток делают применение асинхронного способа пуска мощных СД проблематичным, а, в некоторых случаях, и невозможным.

Проблема пуска мощных синхронных двигателей (СД) с токоограничением не теряет своей актуальности, в первую очередь, для разворота механизмов со значительным моментом статического сопротивления, а также в условиях питания двигателей от протяженных электрических сетей, что характерно для приводов механизмов буровых установок нефте- и газодобывающей промышленности, турбокомпрессоров газоперекачивающих станций и карьерных экскаваторов.

Параметрические способы пуска с использованием реакторов, автотрансформаторов и полупроводниковых регуляторов напряжения (ТРН) обеспечивают ограничение пусковых токов, однако не позволяют создать необходимых пусковых моментов для разворота СД вышеперечисленных механизмов.

Повышение пускового момента СД может быть достигнуто:

1) применением специальных законов управления контуром возбуждения (циклическое управление напряжением возбуждения, непрерывное или ступенчатое изменение величины сопротивления пускового резистора, а также их совместное управление) [1];

2) усложнением системы возбуждения СД (пусковые индукционные сопротивления в роторе, системы возбуждения с преобразователями двусторонней проводимости, емкостные накопители энергии в контуре возбуждения) [1, 2];

3) изменением конструкции собственно СД (применение расщепленных обмоток возбуждения с последовательными конденсаторами, размещение поперечной обмотки возбуждения) [3, 4].

Однако перечисленные способы не позволяют создать необходимых пусковых моментов при ограничении токов статора на заданном уровне.

Постановка задачи. Задачей работы является повышение пускового момента СД для разворота механизмов со значительным моментом статического сопротивления при одновременном ограничении токов статора и пусковой обмотки.

Изложение основного материала. В режиме асинхронного пуска СД электромагнитный момент создается, в основном, пусковой (демпферной) обмоткой, а обмотка возбуждения (ОВ) загружена не полностью. В зависимости от конструкции СД, амплитуда пускового тока ОВ частоты скольжения лежит в пределах 0,8...1,6 номинального тока возбуждения. Для обеспечения устойчивости двигателя обмотка возбуждения в режиме форсировки должна

выдерживать токовую нагрузку не менее 1,4-кратного значения номинального тока возбуждения в течение 20...50 с., что обычно значительно больше, чем время пуска, то есть в тепловом отношении обмотка возбуждения практически остается недогруженной.

Как известно, мгновенное значение электромагнитного момента от ОВ СД определяется выражением

$$m_f = \frac{U \cdot x_{ad}}{x_d} i_f \sin(\theta), \quad (1)$$

где U – напряжение статора; x_{ad}, x_d – соответственно, сопротивление взаимной индукции и индуктивное сопротивление по продольной оси; i_f – ток обмотки возбуждения; θ – угол между векторами напряжения статора и током обмотки возбуждения.

Как видно из приведенного соотношения, для повышения электромагнитного момента, создаваемого ОВ, необходимо увеличивать протекающий в ней ток.

Кроме того, в асинхронном режиме невозбужденного синхронного двигателя из-за фазового сдвига между э.д.с. и током ОВ вращающий момент, создаваемый последней, будет положительным, если полярность э.д.с. и тока совпадают, а при их разноименной полярности создается тормозной момент.

Принимая начальную фазу э.д.с. равной нулю, получим [5]

$$e_f = E_{mf} s_0 \sin s_0 t, \quad (2)$$

где E_{mf} – амплитудное значение э.д.с. обмотки возбуждения; s_0 – фиксированное значение скольжения; t – текущее время.

Ток в ОВ отстает от э.д.с. на угол

$$\psi_2 = \arctg \frac{s_0 T'_d}{1 + k_n}, \quad (3)$$

где $T'_d = \frac{x_f}{R_f}$ – переходная постоянная времени ОВ;

k_n – кратность пускового резистора.

Тогда ток ОВ равен

$$i_f = I_{mf} \sin(s_0 t - \psi_2), \quad (4)$$

где I_{mf} – амплитудное значение тока ОВ.

$$I_{mf} = \frac{E_{mf} s_0}{R_f \sqrt{(1 + k_n)^2 + (s_0 T'_d)^2}}. \quad (5)$$

При включении емкостного накопителя энергии переходная постоянная времени будет иметь вид

$$T_d' = \frac{x_f - x_c / s^2}{R_f}, \quad (6)$$

где x_f, x_c – индуктивное сопротивление ОВ и приведенное значение емкостного сопротивления накопителя энергии на частоте сети.

Анализ выражений (3) (5) и (6) показывает, что при включении емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) увеличивается амплитудное значение тока I_{mf} и уменьшается угол ψ_2 . Кроме того, целесообразно уменьшать кратность пускового резистора на протяжении всего периода пуска СД.

Поскольку сопротивление ЕНЭ нелинейно зависит от частоты скольжения ротора, то накопитель необходимо выполнять таким образом, чтобы емкостное сопротивление автоматически уменьшалось в зависимости от частоты скольжения ротора.

Емкостное сопротивление накопителя энергии, обеспечивающее максимальный электромагнитный момент СД на протяжении всего периода пуска, может быть найдено из выражения

$$x_c = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}, \quad (7)$$

где

$$A = x_{\sigma kd} s^2 + 2x_{\sigma f} s^2 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}};$$

$$B = x_{\sigma f} x_{\sigma kd} s^4 + x_{\sigma f}^2 s^4 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}} x_{\sigma f} s^2 + R_f^2 s^2.$$

Расчетная зависимость $x_c = f(s)$, при значении пускового резистора $8R_f$ для двигателя типа СДСЗ–2000–100 мощностью 2000 кВт, со скоростью вращения 100 об./мин, приведена на рис. 1.

Как известно, ток высокого стержня, который размещен в ферромагнитной среде, вытесняется в направлении воздушного зазора при частоте сети [5].

Таким образом, если ЕНЭ выполнить в виде емкостных стержней, каждый из которых состоит из плоских шин, разделенных слоем диэлектрика переменной толщины по высоте, электрически связанных между собой и уложенных в глубокие пазы полюсных наконечников, то параметры такого накопителя будут зависеть от частоты вращения ротора. В начале пуска будет работать только верхняя часть стержня, его рабочее сечение будет незначительно, и емкость будет иметь минимальное значение, а сопротивление – максимальное.

По мере разгона двигателя уменьшается частота тока, наводимого в ОВ, а также падает эффект вытеснения тока, что приводит к увеличению эффективной площади емкостного стержня и величины ем-

кости, а также к уменьшению сопротивления стержня. При достижении номинальной частоты вращения ротора явление вытеснения тока практически полностью исчезает, и ток распределяется равномерно по всему сечению стержня, его емкость достигнет максимального значения, а сопротивление – минимального.

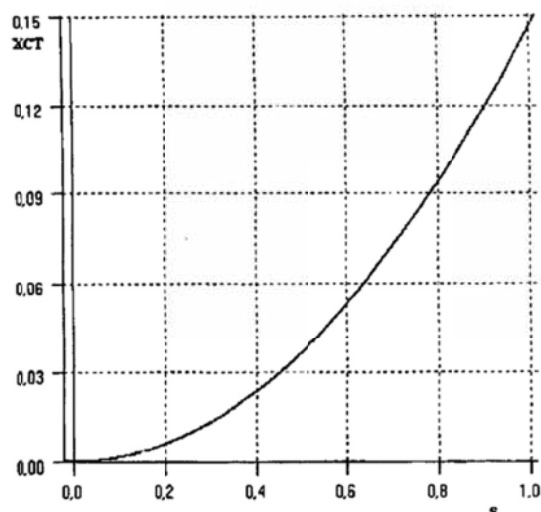


Рис. 1. Зависимость $x_c = f(s)$ при $R_n = 8R_f$: x_c – емкостное сопротивление накопителя энергии; s – скольжение; R_f – сопротивление обмотки возбуждения синхронного двигателя

Для подтверждения основных теоретических положений, на основании уравнений Парка-Горева, выраженных в относительных единицах (о.е.), был выполнен расчет пуска СД в асинхронном режиме.

Пусковые характеристики для исследуемого двигателя, при кратности пускового резистора, равной $8R_f$, приведены на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: M – электромагнитный момент СД; I_s – ток статора; I_f – ток контура возбуждения; ω – частота вращения ротора двигателя. Анализ расчетных зависимостей показывает, что пусковой момент двигателя достигает пятикратного значения при среднем асинхронном моменте 1,6 о.е. вплоть до скольжения, равного 0,2. Величина пускового тока статора достигает 7 о.е. Время асинхронного пуска составило 1200 эл.с. Ток обмотки возбуждения лежит в пределах 2,2 о.е.

Расчетные зависимости пусковых характеристик при величине пускового резистора $8R_f$ и переменном значении емкости НЭ в соответствии с зависимостью $x_c = f(s)$, полученной по кривой рис.1, приведены на рис. 3. Начальное значение емкости НЭ принято 50 мкФ. Анализ расчетных зависимостей показывает, что максимальный пусковой момент двигателя достигает четырехкратного значения по отношению к номинальному, при среднем асинхронном моменте, превышающем 2 о.е. на всем

протяженні пуску. Суттєво зростає ток обмотки возбуждення до 6,4 о.е., при цьому ток статора не перевищує рівня в 7,5 о.е. Время пуску складало 950 зл.с.

На основі изложеного матеріала можна зробити наступні **ВИВОДИ**:

1. Застосування нелінійного ємкісного накопичувача енергії з змінною величиною ємкості дозволяє підтримувати максимальний вращаючий момент на всьому протяженні пуску СД.

2. Застосування нелінійного накопичувача енергії дозволяє суттєво покращити пускову характеристику СД при рівному значенні току статора по відношенню до асинхронного резисторного способу, скоротити время пуску.

3. Розробане схемотехнічне рішення може бути застосоване в електроприводі механізмів з значительним моментом статического спротивлення або при живленні СД від протяжених електричних ліній.

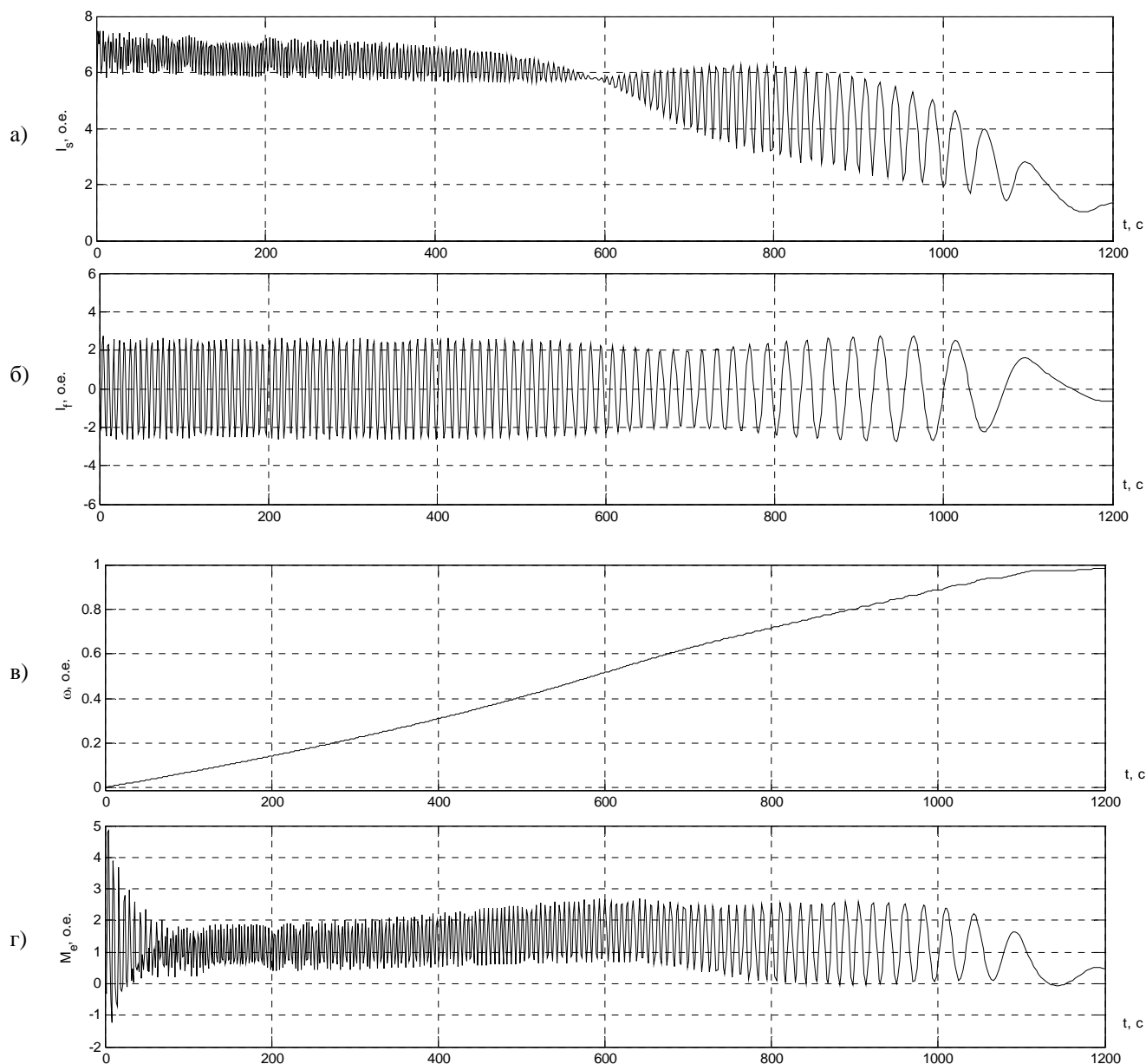


Рис. 2. Расчетные зависимости пуска синхронного двигателя с восьмикратным дополнительным резистором: а) частота вращения; б) электромагнитный момент; в) ток статора; г) ток в обмотке возбуждения

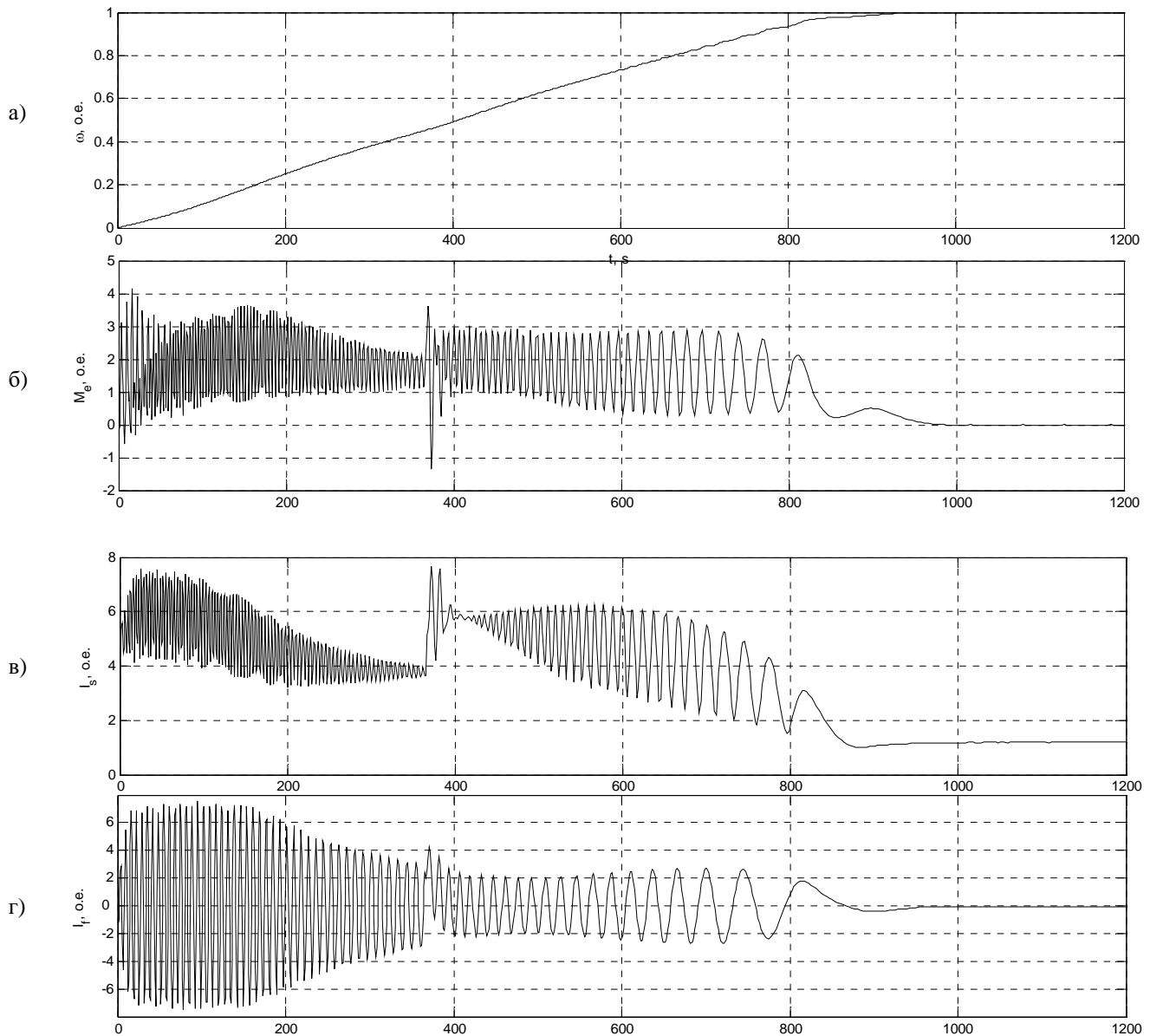


Рис. 3. Расчетные зависимости пуска синхронного двигателя при переменном значении емкостного накопителя энергии: а) частота вращения; б) электромагнитный момент; в) ток статора; г) ток в обмотке возбуждения

Список литературы / References

1. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография / [А.П. Черный, А.И. Гладырь, Ю.Г. Осадчук и др.] – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В. – 2006. – 280 с.
 Chornyy, A.P., Gladyyr, A.I., Osadchuk, Yu.G., Kurbanov, I.R., Voshun, A.N. (2006), *Puskovyie sistemy nereguliruyemykh elektroprivodov* [Start-Up Systems of Unregulated Electric Drives], ChP Shcherbatykh F.V., Kremenchug, Ukraine.
 2. Низимов В.Б. Применение накопителей энергии для асинхронного пуска синхронных двигателей /

В.Б. Низимов // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 1. – С. 49–51.
 Nizimov, V.B. (2000), “The use of energy storage devices for asynchronous ignition of synchronous motors”, *Naukovyi visnyk NGA Ukrainy*, no. 1, pp. 49–51.
 3. Пивняк Г.Г. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных двигателей / Г.Г. Пивняк, В.И. Кириченко, В.А. Бородай // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки“ – К., 2002. – Ч. 2. – С. 62–65.
 Pivniak, G.G., Kirichenko, V.I., Borodai, V.A., (2002), “A new direction to improve large synchronous motors”,

Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki", part 2, pp. 62–65.

4. Пирматов Н.Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н.Б. Пирматов, М.Г. Ахматов, И.К. Камалов // *Электричество*. – 2003. – № 2. – С. 64–65.

Pirmatov, N.B., Akhmatov, M.G., Kamalov, I.K., (2003), "The research of the synchronous motor with excitation in the longitudinal and transverse axes under shock loadings", *Electrichestvo*, no. 2, pp. 64–65.

5. Низимов В.Б. Оптимизация пусковых режимов синхронных электроприводов с емкостными накопителями энергии / В.Б. Низимов, А.М. Сьянов, А.В. Качура // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. – 2002. – Вып. 1. – С. 145–150.

Nizimov, V.B., Syanov, A.M., Kachura, A.V., (2002), "Optimization of the starting mode of synchronous motors with capacitive energy storage", *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologii. Nauchnye trudy KGPU*, Vol. 1, pp. 145–150.

Мета. Дослідження динаміки пускових режимів синхронних двигунів з нелінійним ємнісним накопичувачем енергії для приведення в обертання механізмів зі значним моментом статичного опору при одночасному обмеженні струмів статора та пускової обмотки.

Методика. Для досягнення поставленої мети запропонований нелінійний ємнісний накопичувач енергії, параметри якого змінюються у функції ковзання, що дозволяє компенсувати індуктивність обмотки збудження синхронного двигуна, а за рахунок зменшення зсуву фаз між векторами е.р.с. і струму, що протікає через цю обмотку, збільшити створюваний нею електромагнітний момент. Перевірка основних теоретичних положень виконана методами чисельного моделювання. Для дослідження впливу нелінійного накопичувача енергії були виконані розрахунки пускових режимів синхронного двигуна за рівняннями Парка-Горєва у відносних одиницях системи „ x_{ad} ”.

Результати. У результаті аналізу отриманих розрахункових залежностей було встановлено, що, у порівнянні з пуском з додатковим резистором кратністю $8R_f$, час пуску двигуна СДС3-2000-100 із запропонованим нелінійним ємнісним накопичувачем зменшився на 20,8% з 1200 ел. с. до 950 ел. с. Момент рушання знизився з 4,8 в.о. до 3, в.о., а середній асинхронний момент зріс з 1,6 в.о. до 2,3 в.о. При цьому струм в обмотці збудження з підключенням накопичувачем на початку пуску досяг значення в 6,5 в.о. Середнє значення струму статора знизилося з 6,2 в.о. до 5,8 в.о.

Наукова новизна. Науковою новизною роботи є запропонована конструкція нелінійного ємнісного

накопичувача енергії, параметри якого нелінійно залежать від частоти струму, що по ньому протікає, та проведені теоретичні дослідження впливу такого накопичувача на характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна.

Практична значимість. Запропонований нелінійний ємнісний накопичувач енергії може знайти своє застосування у складі пускових пристроїв для синхронних двигунів приводів ряду промислових механізмів.

Ключові слова: синхронний двигун, нелінійний накопичувач енергії, полегшений пуск

Purpose. To study the synchronous motors starting modes dynamics with nonlinear capacitive energy storage for driving the rotation mechanism with considerable momentum static resistance while limiting the stator and start windings currents.

Methodology. To reach the goal we have proposed nonlinear capacitive energy storage. Its parameters vary as a function of slip. This allows to compensate the synchronous motor excitation winding inductance, and by reducing the phase shift between the vectors of the e.m.f. and the current flowing through the coil, to increase the electromagnetic torque generated by it. The checking of the basic theoretical positions was made by numerical modeling methodology. For the research of influence of the nonlinear energy storage we have calculated synchronous motor starting modes by Park-Gorev equations in relative units of the system “ x_{ad} ”

Findings. The analysis of the calculated dependence showed that, compared to starting with an additional resistor multiplicity $8R_f$, start-up time СДС3-2000-100 motor with the proposed non-linear capacitive storage decreased by 20.8% from 1200 r.u. to 950 r.u. Starting torque decreased from 4.8 r.u. to 3 r.u., and the average asynchronous torque increased from 1.6 r.u. to 2.3 r.u. The current in the field winding, connected to the energy storage, reached the value of 6.5 r.u. in the beginning of start-up. The average value of the stator current decreased from 6.2 r.u. to 5.8 r.u.

Originality. We have proposed the construction of the nonlinear capacitive energy storage, parameters of which depend nonlinearly on the frequency of the current flowing through it, and carried out theoretical studies of its influence on the asynchronous start of synchronous motor.

Practical value. The proposed non-linear capacitive energy storage can find its application in the starters for synchronous motors in driving systems of wide range of industrial machinery.

Keywords: synchronous motor, nonlinear capacitive energy storage, alleviated startup

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.М. Сьяновим. Дата надходження рукопису 12.02.13.