

ОПТИМИЗАЦИЯ ПУСКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ СО СКАЛЯРНОЙ САР

И.Я. Браславский, А.В. Костылев, Д.В. Цибанов, А.И. Хабаров

В работе рассматриваются принципы оптимизации частотно-регулируемых асинхронных электроприводов со скалярными разомкнутыми системами управления. Обсуждаются вопросы формирования специальных законов управления, предназначенных для работы в динамических (пуско-тормозных режимах). Предлагаются структуры для реализации указанных законов. Также обсуждается вопрос начального намагничивания асинхронного привода в скалярной системе. Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, оптимизация, скалярное управление.

Введение

В современных электроприводах переменного тока с частотным управлением используются два основных варианта систем регулирования – скалярная и векторная. Скалярные системы отличаются относительной простотой, менее критичны к изменению параметров двигателя, проще в наладке. Особенно это относится к разомкнутым системам. Это объясняет широкое распространение таких структур, в том числе, в электроприводах, решающих задачи обеспечения энергоэффективности [1]. Однако скалярные системы обладают ограниченными возможностями формирования благоприятных электромагнитных процессов в двигателе, в особенности применительно к электроприводам высокочастотных механизмов, работающих при быстрых изменениях управляющих и возмущающих воздействий. Используемые в скалярных системах фиксированные законы управления выбираются, как правило, исходя из функционирования электропривода в установившихся режимах, но не являются оптимальными для формирования динамических процессов [2]. При этом оказываются недоиспользованными ресурсы преобразователя частоты по току и напряжению по формированию предельно допустимых электромагнитных моментов двигателя в динамических режимах. С другой стороны, фиксированные законы управления, выбранные исходя из оптимального функционирования электропривода в динамических режимах, оказываются неприемлемыми применительно к установившимся режимам, прежде всего, с точки зрения распределения потерь в двигателе.

Постановка задачи оптимизации пускового процесса

Эффективность пускового процесса может быть оценена по различным критериям [3]. С точки зрения энергосбережения целесообразно уменьшение потерь энергии в электродвигателе. Минимизация перегрева обеспечивает увеличение срока службы двигателя. Однако если речь идет о динамичном электроприводе, встает задача обеспечения максимально возможных моментов при

ограничениях ресурса преобразователя и питающей сети. В этом варианте целесообразно в качестве основного показателя рассматривать критерий эффективности электромеханического преобразования [4]:

$$k = \frac{|m|}{i_s}, \quad (1)$$

где k – коэффициент эффективности электромеханического преобразования; i_s – модуль тока статора; m – момент двигателя.

В традиционных векторных системах, в области рабочих нагрузок, этот коэффициент стремится к единице. Оптимальные системы с регулированием магнитного потока в функции нагрузки позволяют увеличивать коэффициент эффективности. В скалярных же системах, не обеспечивающих регулирование потока двигателя, коэффициент эффективности несколько меньше единицы.

Рассмотрим процесс пуска асинхронного двигателя в скалярной системе управления при использовании традиционного пропорционального закона частотного управления ($u/f = \text{const}$). При моделировании переходных процессов была использована традиционная система относительных единиц [5]. Процессы пуска приведены на рис. 1. для двигателя с $P_N = 55$ кВт, $n_N = 1470$ об/мин. Время разгона составило 2 с, момент сопротивления, приложенный к двигателю, равен номинальному, момент, развиваемый при пуске, примерно $1,3 M_N$.

Отсутствие на начальном этапе пускового процесса магнитного потока приводит к ожидаемым броскам тока и повышенной колебательности процессов. Коэффициент эффективности электромеханического преобразования существенно меньше единицы и практически повторяет форму переходного процесса по модулю потокосцепления ротора.

Традиционным решением улучшения процессов в скалярной системе является модификация законов частотного управления введением добавочного напряжения в области низких частот. Такая добавка форсирует процесс намагничивания машины при пуске и, тем самым, улучшает коэффициент эффективности. К сожалению, величина добавки зависит от целого ряда факторов и, преж-

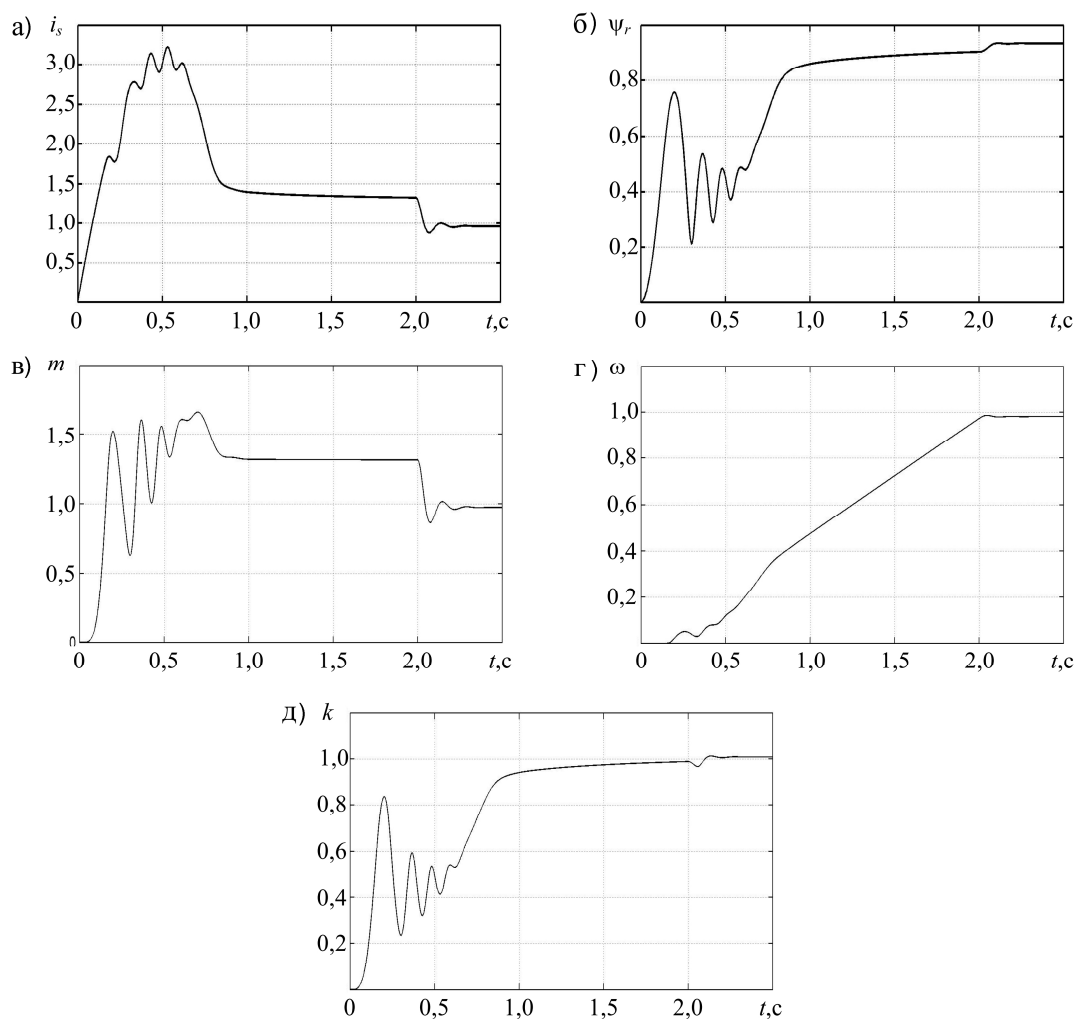


Рис. 1. Процесс пуска асинхронного двигателя в скалярной системе с пропорциональным законом управления:
а – модуль тока статора; б – модуль потокосцепления ротора; в – момент двигателя; г – скорость;
д – коэффициент эффективности электромеханического преобразования

де всего, от требуемого пускового момента. Зачастую полученный введением добавки закон частотного управления становится эффективным только при больших нагрузках и вызывает перегрев двигателя при малых [5].

Структуры оптимизированных скалярных систем

Достаточно эффективным приемом оптимизации скалярных систем с точки зрения энергетики двигателя является применение двух законов частотного управления, один из которых обеспечивает оптимальные процессы в динамических (пуско-тормозных) режимах, а другой – в установившихся длительных [3, 4].

Так, на рис. 2 приведена упрощенная структурная схема скалярной САР с двумя законами управления.

На схеме изображено: ЗИ – задатчик интенсивности; ФП1 – функциональный преобразователь, реализующий закон частотного управления для динамических режимов; ФП2 – функциональ-

ный преобразователь, реализующий закон частотного управления в длительном режиме; К – коммутатор; ПКН – преобразователь координат напряжения; f_s – сигнал задания; f_s – частота вращения статора; $u_{s,1}$ – модуль напряжения статора в динамическом режиме; $u_{s,2}$ – модуль напряжения статора в установившемся режиме; u_s^* – заданный модуль напряжения статора; $u_{s,a,b,c}^*$ – заданные фазные напряжения.

Рассматриваемый вариант системы обеспечивает независимую оптимизацию пуско-тормозных и установившегося режимов работы. Однако закладываемые в систему законы управления рассчитываются под конкретный, наиболее вероятный момент нагрузки. Универсализация законов приводит к серьезным усложнениям алгоритмов регулирования. Кроме того, определенные сложности представляет реализация функции автоматического переключения законов.

Упрощенно задача обеспечения электромеханической эффективности может быть решена в рамках структуры, приведенной на рис. 3.

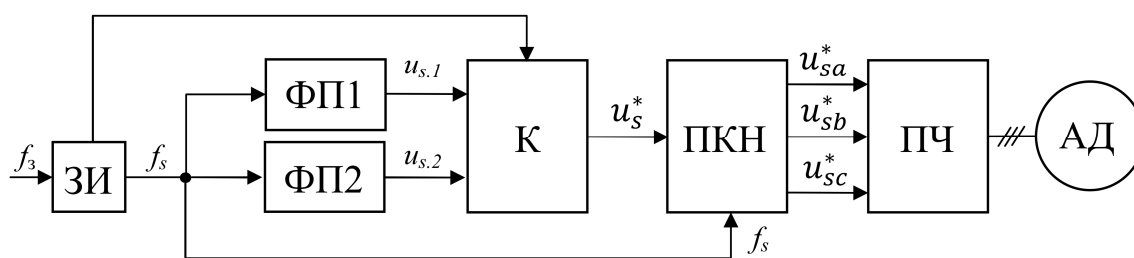


Рис. 2. Структурная схема скалярной САР с двумя законами управления

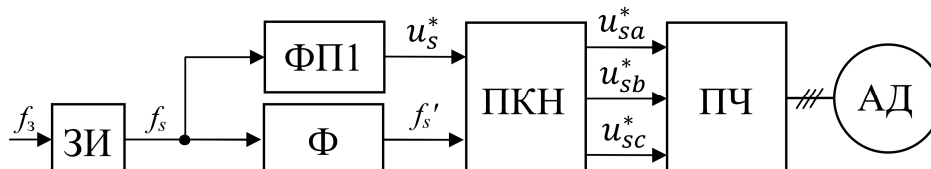


Рис. 3. Структурная схема скалярной САР с фильтром (Ф)

Фильтр Φ создает фазовое запаздывание, в результате действия которого частота формируется с задержкой по отношению к напряжению. В результате по отношению к базовому закону система создает большее напряжение и, как следствие, форсирует поток. По окончании действия задатчика интенсивности система автоматически переходит на исходный закон частотного управления. При пропорциональном базовом законе управления закон в динамическом режиме выглядит так, как показано на рис. 4.

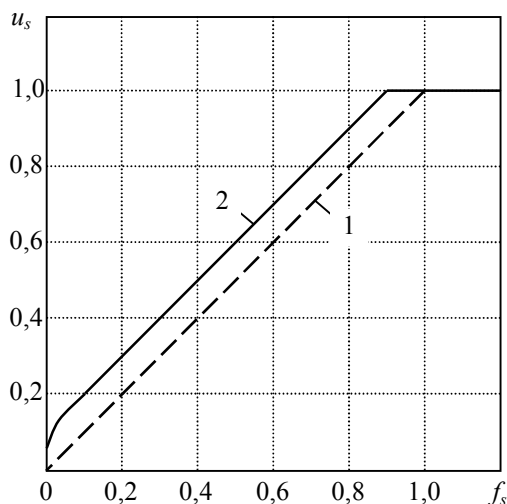


Рис. 4. Законы частотного управления в скалярной САР с фильтром (Ф): 1 – базовый статический закон; 2 – динамический закон

Как видно из графика, добавка по напряжению действует во всем диапазоне частот, что дополнительно повышает коэффициент эффективности электрохимического преобразования, однако строго значение этой добавки не соответствует оптимальному процессу.

Графики процесса пуска в предлагаемой системе приведены на рис. 5.

Коэффициент эффективности электрохимического преобразования в предлагаемой системе существенно увеличивается, что позволяет полностью использовать преобразователь частоты по выходному току.

Следует указать, что постоянная времени вводимого фильтра должна выбираться как с учетом темпа разгона, так и с учетом прикладываемой нагрузки. Однако, учитывая изначальную неоптимальность такой структуры, выбор постоянной времени не является строгой задачей.

Предварительное намагничивание двигателя

Дополнительным фактором, существенно влияющим на пусковой процесс, как было отмечено выше, является начальный магнитный поток двигателя. Как правило, в скалярных системах пуск выполняется при нулевых начальных условиях. В системе происходят одновременно два процесса: намагничивание двигателя и собственно разгон до заданной скорости. Это приводит к тому, что момент формируется в основном за счет тока статора на начальном этапе пуска. Это приводит к серьезным броскам тока и выходу системы управления в режим токоограничения.

Очевидна целесообразность предварительного намагничивания двигателя подобно тому, как это выполняется в векторных системах или в электроприводе постоянного тока. Векторное управление обеспечивает предварительное намагничивание двигателя постоянным током. Однако в разомкнутой скалярной системе такое решение встречает известные трудности. Действительно, коэффициент передачи по напряжению двигателя на постоянном токе достаточно высок. Для формирования номинального потока требуется малое напряже-

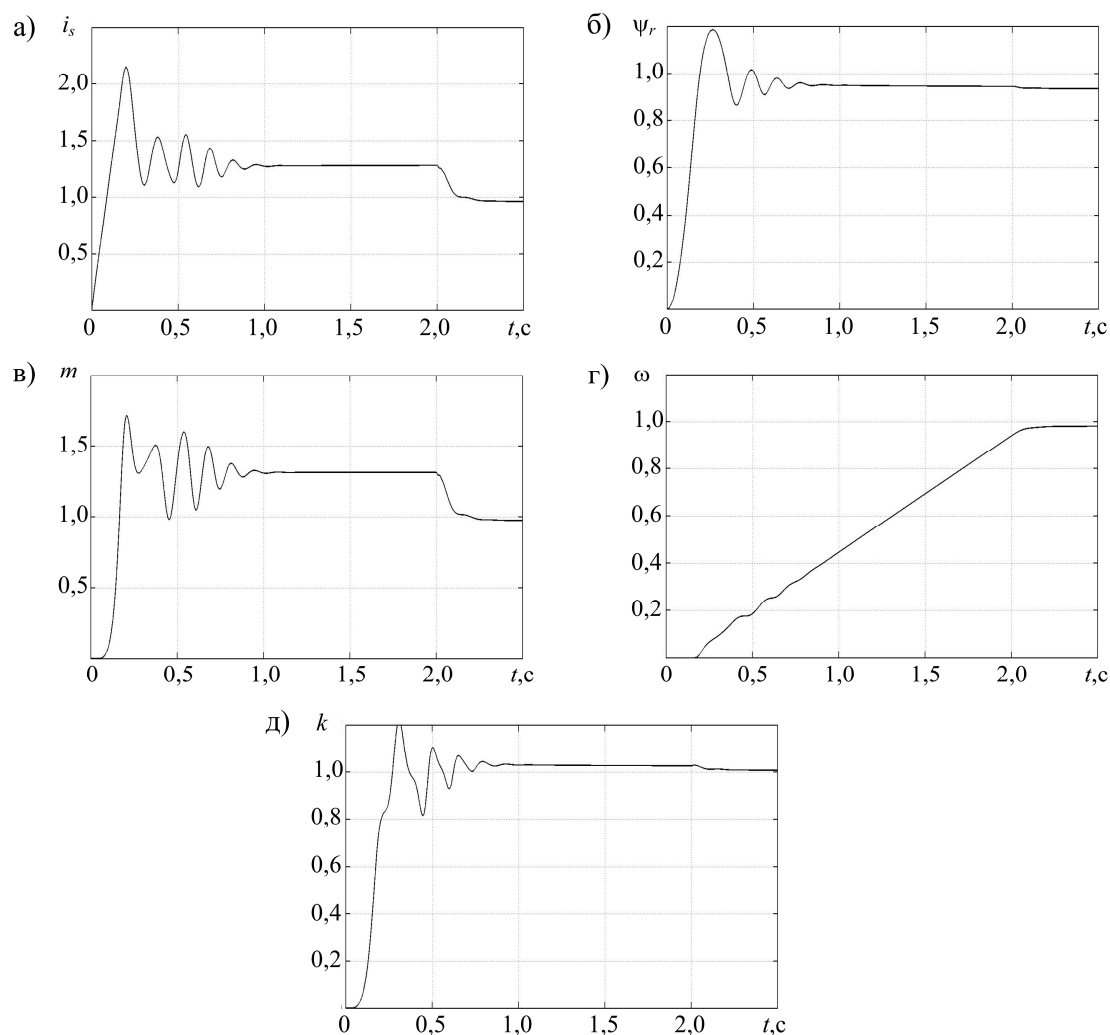


Рис. 5. Процесс пуска асинхронного двигателя в скалярной системе с фильтром:
а – модуль тока статора; **б** – модуль потокоцепления ротора; **в** – момент двигателя;
г – скорость; **д** – коэффициент эффективности электромеханического преобразования

ние, реализовать которое без замкнутого контура тока проблематично. Кроме того, необходимо учитывать требуемую начальную фазу вектора потокоцепления и, как следствие, предусматривать блок ориентации системы координат.

Более логичным для скалярного управления представляется формирование начального потока напряжением малой частоты. Частоту следует выбирать таким образом, чтобы генерируемый момент двигателя не превышал момента сопротивления. Магнитный поток может при этом не достигать номинального значения, однако даже в этом случае эффект преднамагничивания существенен.

Процессы пуска с учетом преднамагничивания двигателя приведены на рис. 6. В данном примере начальная частота составила половину от номинального скольжения.

Основным эффектом предварительного намагничивания является снижение колебаний тока и потокоцепления двигателя. Уменьшается начальный бросок тока, «облагораживается» форма

переходного процесса. Повышается интегральное значение коэффициента эффективности электро-механического преобразования. Следует заметить, что суммарные потери энергии при пуске, включая потери на намагничивание, не превышают потерь аналогичного процесса без предварительного намагничивания. Это легко объясняется снижением амплитуд бросков пускового тока в системе. Потери, вызванные электромагнитными переходными процессами, существенно снижаются.

Заключение

Как видно, описанная модификация разомкнутой скалярной системы управления позволяет повысить динамические свойства электропривода при идентичных ограничениях по току и напряжению источника питания. Простота реализации предложенных решений, слабая чувствительность как к параметрам двигателя, так и к параметрам нагрузки делает данное решение вполне конкурентоспособным.

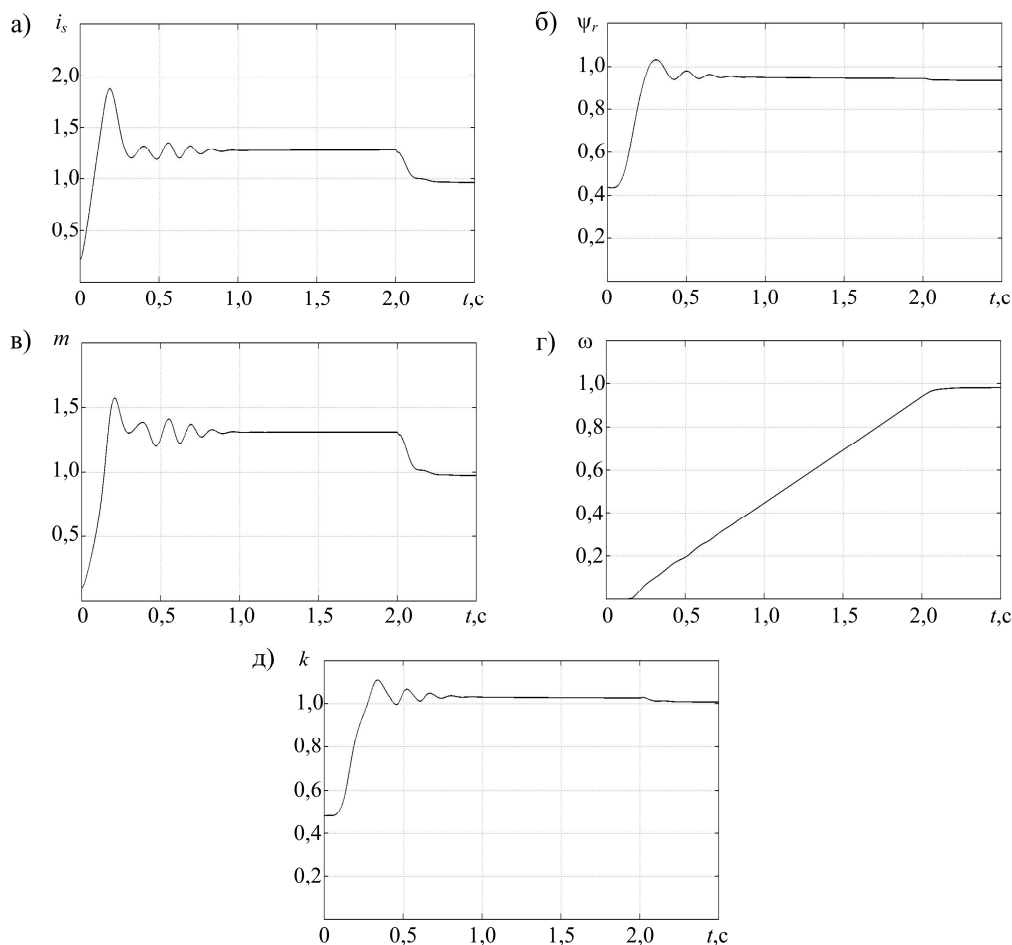


Рис. 6. Процесс пуска асинхронного двигателя в скалярной системе с преднамагничиванием
а – модуль тока статора; б – модуль потокоцепления ротора; в – момент двигателя; г – скорость;
д – коэффициент эффективности электромеханического преобразования

Литература

1. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 202 с.
2. Braslavsky, I.Ya. Optimization of starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor / I.Ya. Braslavsky, A.V. Kostylev, D.P. Stepanijk // Proceeding of the 13th International Power Electronics and Motion Control conference. – Poznan, Poland, 2008. – P. 97–101.
3. Браславский, И.Я. Исследование оптимальных пусковых процессов в системе «реальная

сеть – ПЧ – АД» / И.Я. Браславский, А.В. Костылев, Д.В. Цибанов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 35–40.

4. Оптимизация асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, С.И. Шилин, А.И. Хабаров // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 25–30.

5. Шрейнер, Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин. – Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2008. – 361 с.

Браславский Исаак Яковлевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)3754566, i.ya.braslavskiy@ustu.ru

Костылев Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)3754646, edd.enin@ustu.ru

Цибанов Дмитрий Валерьевич, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)3754646, edd.enin@ustu.ru

Хабаров Андрей Игоревич, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)3754646, edd.enin@ustu.ru

Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 69–74

STARTING PROCESS OPTIMIZATION IN THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH A SCALAR CONTROL SYSTEM

I.Ya. Braslavskiy, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation,
i.ya.braslavskiy@ustu.ru

A.V. Kostylev, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation, *edd.enin@ustu.ru*

D.V. Tsibanov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation, *edd.enin@ustu.ru*

A.I. Khabarov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation, *edd.enin@ustu.ru*

This paper describes the principles of optimization of asynchronous variable frequency induction motor drives with scalar open loop control systems. The problems of the development of special control laws designed for dynamic (starting-breaking) modes. The structures for specified control laws are offered. Also the question of the initial magnetization in the induction motor scalar system is discussed. Simulating results are given.

Keywords: Induction motor drive, optimization, scalar control.

References

1. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushiy asinkhronniy elektroprivod*, Moscow, 2004, 202 p.
2. Braslavsky I.Ya., Kostylev A.V., Stepanijk D.P. Optimization of starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor / *Proceeding of the 13th International Power Electronics and Motion Control conference*, Poznan, Poland, 2008, pp. 97–101
3. Braslavsky I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V. Issledovanie optimalnikh puskovikh processov v sisteme "realnaya set – PCH – AD", *Russian Electrical Engineering*, 2012, no. 9, pp. 35–40.
4. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Shilin S.I., Khabarov A.I. Optimizaciya asinkhronnogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda so skalyarnoy sistemoy upravleniya, *Russian Electrical Engineering*, 2012, no. 9, pp. 25–30.
5. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Krivoviyaz V.K., Shilin S.I. *Electromekhanicheskie i teplovie regimi asinkhronnikh dvigateley v sistemakh chastotnogo upravleniya*, Ekaterinburg, 2008, 361 p.

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.