

УДК 62.573

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-62-69

Система векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с ограничением пусковых токов

К.В. Лицин, С.Н. Басков

Рассмотрен вопрос реализации пуска высоковольтного синхронного двигателя. Проблема пуска двигателей переменного тока высокой мощности достаточно существенна, поэтому их оставляют в работе, чтобы свести к минимуму количество пусков. Основное затруднение при пуске синхронного двигателя высокой мощности состоит в том, что возникают пусковые токи, превышающие номинальный в семь раз. Кроме того, имеются факторы, отрицательно влияющие на других потребителей сети.

Предложена реализация пуска высоковольтного синхронного двигателя с помощью векторно-импульсного способа. Приведена функциональная схема разработанного электропривода, имеющая несколько отличительных особенностей. В ней предусмотрены промежуточные трансформаторы, использование которых позволяет применить в схеме IGBT-транзисторы с максимальным напряжением 600...1200 В. Дана структурная схема модуля определения обобщенного вектора напряжения. Проанализирована схема ограничения пусковых токов. Проведены экспериментальные исследования на разработанной в Matlab Simulink модели. Из результатов эксперимента следует, что система обрабатывает процесс пуска синхронного двигателя. Оценено влияние промежуточных трансформаторов. Выявлено, что они незначительно ухудшают процесс разгона синхронного двигателя. Время разгона двигателя при внедрении промежуточных трансформаторов увеличилось на 0,7 с. С другой стороны, наличие промежуточных трансформаторов позволит уменьшить стоимость системы в 1,3...1,7 раз в зависимости от мощности двигателя.

Ключевые слова: бездатчиковый способ, векторно-импульсный пуск, синхронный двигатель, трансформатор, триггер.

Для цитирования: Лицин К.В., Басков С.Н. Система векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с ограничением пусковых токов // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 62—69. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-62-69.

System of Vector-Pulse Start-Up of High-Voltage Synchronous Motor with Inrush Current Limiting

K.V. Litsin, S.N. Baskov

This article deals with the implementation of the start of a high-voltage synchronous motor. At present, the problem of starting high-power alternating current motors is acute. Therefore, they are left in operation to minimize the number of starts. The main problem of starting a synchronous high-power motor is that starting currents are generated that exceed the rated current seven times. In addition, there are other problems that negatively affect other consumers of the network. It is proposed to implement the start-up of a high-voltage synchronous motor using a vector-pulse method in this article. A functional diagram of the developed electric drive is given. This scheme has several distinctive features. In the scheme, intermediate transformers are provided. Their use makes it possible to use IGBT-transistors with a maximum voltage of 600 to 1200 V in the circuit. The structural scheme of the module for determining the generalized voltage vector is given. The scheme of limitation of starting currents is considered. Experimental studies were carried out on the model developed in Matlab Simulink. From the results of the experiment it follows that the system fulfills the process of starting a synchronous motor. The influence of intermediate transformers is estimated. It was revealed that the intermediate transformers slightly worsen the process of synchronous motor acceleration. The acceleration time of the motor during the introduction of intermediate transformers increased by 0.7 s. On the other hand, the availability of intermediate transformers will reduce the cost of the system in 1.3...1.7 times depending on the motor power.

Key words: sensorless method, vector-pulse start, synchronous motor, transformer, trigger.

For citation: Litsin K.V., Baskov S.N. System of Vector-Pulse Start-Up of High-Voltage Synchronous Motor with Inrush Current Limiting. Bulletin of MPEI. 2019;3:62—69. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-62-69.

Мощные высоковольтные синхронные двигатели эксплуатируются в качестве двигателей таких установок, как привод поршневых компрессоров, воздуходувок, гидравлических насосов и т. д. [1 — 4]. Использование синхронных двигателей позволяет устранить проблему, связанную с компенсацией реактивной мощности [5 — 8].

С другой стороны, применение синхронного двигателя сопряжено с проблемой его пуска. Так, в ходе прямого асинхронного пуска высоковольтного синхронного электродвигателя возникают броски пускового тока, превосходящие значение номинального тока в 6...8 раз [9 — 13]. Кроме того, на процесс пуска оказывает влияние режим работы цепи возбуждения. За счет автоматического регулирования тока возбуждения реализуется возможность получения оптимального режима по реактивной энергии. В связи с этим на предприятиях пускают мощные синхронные двигатели не более десяти раз, не выключая или не уменьшая их скорости при необходимости. Таким образом, существенно возрастают затраты на электроэнергию [14 — 17].

Актуальным направлением является разработка системы пуска, которая бы позволила избежать основных недостатков, возникающих при старте эксплуатации синхронного двигателя. Цель настоящей статьи — разработка системы пуска высоковольтного синхронного двигателя.

В работе [18] предложена реализация векторно-импульсного способа пуска, который реализуется согласно тому, что статор двигателя подключают к сети импульсно в тот момент, когда величина угла между вектором потокоцепления ротора и статора не превышает 180°. Проблема одновременного подключения и отключения обмоток может быть легко решена только с помощью современных силовых полупроводниковых приборов, силовых IGBT-транзисторов. Предложенная схема выполнена на синхронном двигателе малой мощности, поэтому необходимо проанализировать возможные варианты, позволяющие учесть особенности высоковольтного исполнения синхронного двигателя. В первую очередь решить проблему высоких напряжений на коллекторе-эмиттере за счёт использования низковольтной ячейки. Кроме того, изложенная в [18] схема векторно-импульсного пуска по причине имеющегося в системе механического датчика угла поворота ротора имеет следующие недостатки:

- низкую надёжность системы;
- высокие массогабаритные параметры.

Второй задачей, стоящей перед авторами настоящей работы, является внедрение разработанного бездатчикового метода определения углового положения ротора.

Система векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с ограничением пусковых токов

Задачу пуска высоковольтного синхронного двигателя возможно решить на базе двухтрансформаторной схемы [19 — 21].

На рисунке 1 изображена функциональная схема системы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с промежуточными трансформаторами, включающая в себя бездатчиковый способ определения углового положения на основе метода высокочастотной инжекции [22].

В состав силовой части схемы входят:

- два трехфазных трансформатора, понижающий (Тр1) и повышающий (Тр2);
- два трехфазных диодных моста VD1 — VD4 и VD5 — VD8;
- два IGBT-транзистора VT1 и VT2, предназначенных для коммутации обмотки статора на стороне постоянного тока; элементы VD9 — VD12 являются снабберной цепью для защиты транзистора от бросков напряжения при коммутации.

Модуль определения положения обобщенного вектора напряжения, идентичный обобщенному вектору потокоцепления статора, реализуется как:

$$\theta_c = \angle \bar{U} = \frac{2}{3} (U_a + aU_b + a^2U_c),$$

где U_a, U_b, U_c — мгновенные значения напряжения на фазных обмотках статора электродвигателя;

$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ — оператор трехфазной системы.

Структурная схема модуля обобщенного вектора напряжения дана на рис. 2.

Сигналы напряжения, поступающие в модуль определения углового положения ротора, предварительно проходят через полосно-пропускающие фильтры (ППФ), реализованные на основе фильтра Баттерворта второго порядка. Идея определения вектора потокоцепления ротора основана на подаче сигнала высокой частоты в обмотку возбуждения ротора и вычислении его положения на основе отфильтрованных значений фазных напряжений [23].

Угол положения ротора равен:

$$\theta_p = \arctg \left(\frac{-0,866}{\frac{1}{k} + 0,5} \right) + 180n,$$

где n — величина поправочного коэффициента, равная 0, 1 или 2 в зависимости от сектора, где находится ротор; k — отношение фазных напряжений U_a/U_b .

С целью поиска необходимого сектора, согласно методике, изложенной в [23], следует определять величину фазного напряжения U_c и переменную составляющую сигнала возбуждения U_f .

Полученные значения величин θ_c, θ_p сравнивают между собой. Затем проверяют условия подключения статора к сети: угол между векторами потокоцепления ротора и статора не должен превышать 180°. В ре-

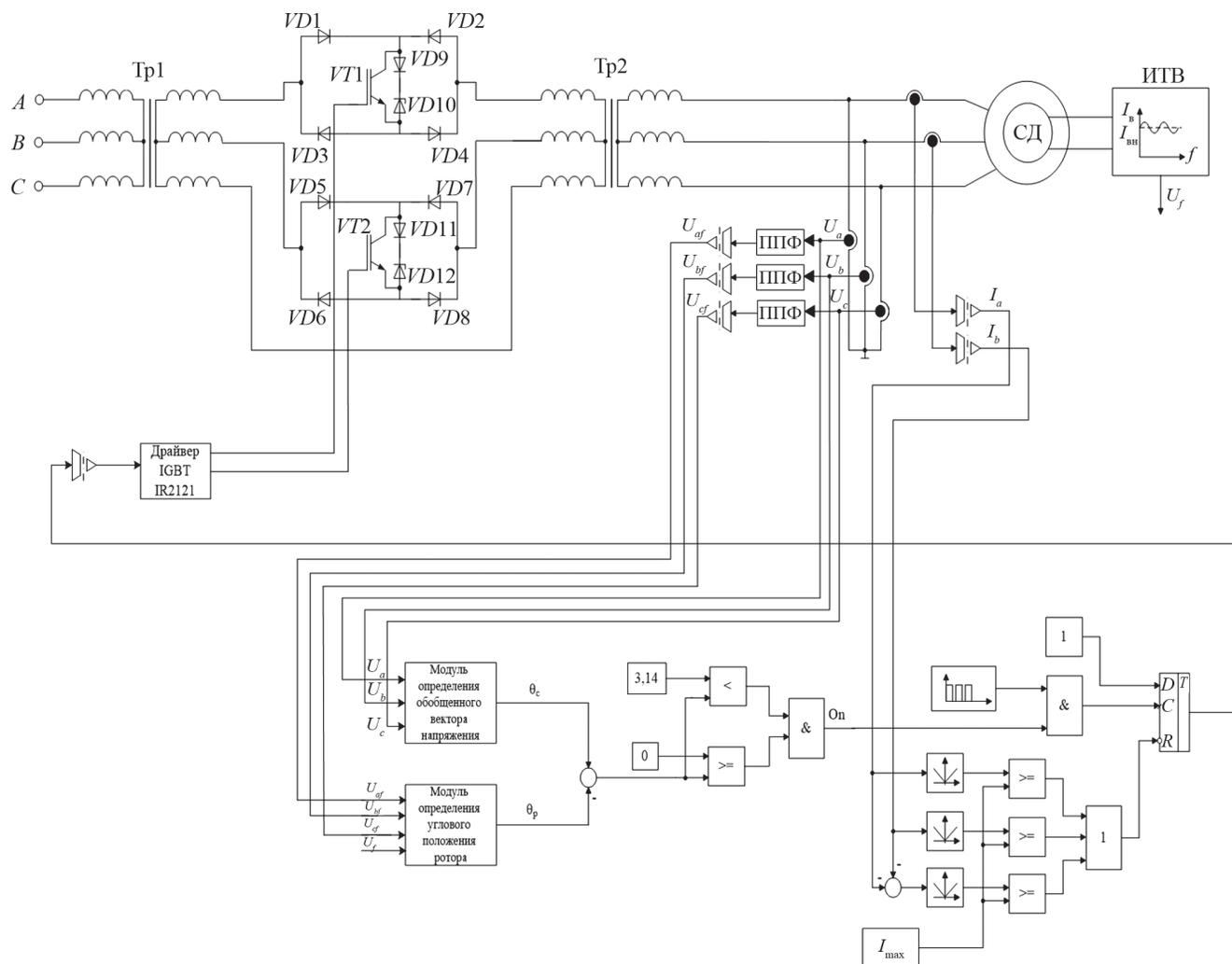


Рис. 1. Функциональная схема системы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя

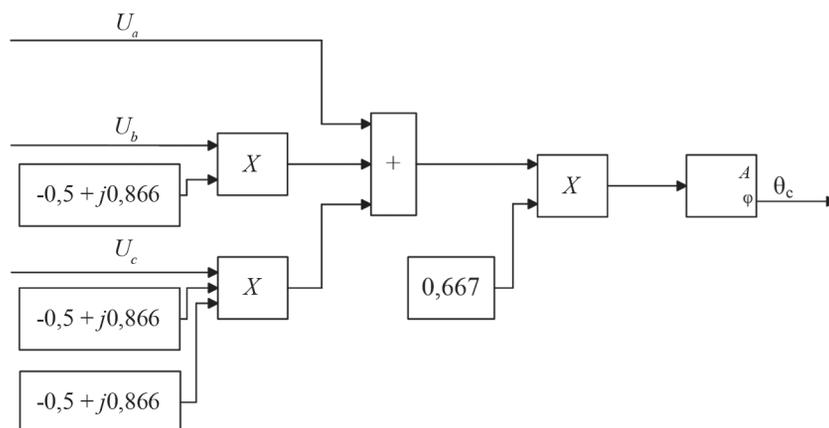


Рис. 2. Структурная схема модуля определения обобщенного вектора напряжения

зультате проверки этого условия формируется сигнал подключения к сети «On».

В разработанной системе необходимо предусмотреть ограничение пусковых токов. Принцип работы разработанного блока ограничений заключается в том, что статор будет отключаться от сети в случае превышения заданной величины фазного тока I_{max} .

Согласно [24], условия для возникновения положительного момента при векторно-импульсном пуске создаются в течение достаточно продолжительного времени. Если подключить статор к сети на весь этот временной промежуток, токи статора значительно превысят номинальные значения. С другой стороны, однократное подключение статора к сети до срабатывания токового ограничения будет кратковременным, что приведет к значительному уменьшению среднего электромагнитного момента при пуске.

Для повышения среднего значения момента при одновременном ограничении тока статора следует обеспечить импульсное подключение статора с ограничением тока в каждом такте. Наиболее широко используемый алгоритм импульсного включения — алгоритм широтно-импульсной модуляции (ШИМ). С его помощью достигаются наиболее благоприятные энергетические характеристики и гармонический состав коммутируемых токов статора.

Ограничение пусковых токов предлагается реализовать с помощью схемы, представленной на рис. 3. В качестве входных величин взяты мгновенные значения токов статора I_a, I_b . Величину I_c вычисляют по первому закону Кирхгофа (синхронный двигатель является симметричной нагрузкой). Блоки 1 — 3 служат для выделения модуля сигнала. Полученные величины поступают в компараторы 4 — 6, предназначенные для сравнения с максимально допустимым значением тока I_{max} . Если величина одного из токов превышает максимально допустимую, выдается сигнал «Сброс ШИМ», полученный с помощью логического элемента «ИЛИ». Сигнал задающего генератора 7 сравнивается с разрешающим сигналом «On». Коэффициент заполнения импульсов задающего генератора выбирают близким к единице. Это позволяет обеспечить максимально возможную ширину импульсов при наличии разрешающего сигнала «On» и фазных токах статора, не превышающих величину I_{max} . Каждый импульс задающего генератора записывает в триггер 8 логическую единицу. Сброс синхронного D-триггера выполняется с помощью сигнала «Сброс ШИМ», поступающего с выхода блока ограничения тока.

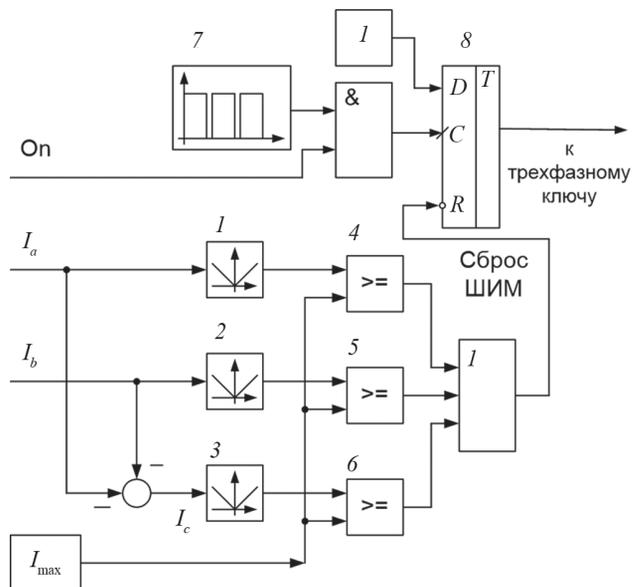


Рис. 3. Структурная схема блока ШИМ с управлением по току статора

Таким образом, в течение всего промежутка времени создания условия для возникновения положительного электромагнитного момента статор двигателя подключается к сети в режиме ШИМ с ограничением тока в каждом такте. Подобный алгоритм обеспечивает максимальное среднее значение электромагнитного момента при регулируемом ограничении тока.

Моделирование системы векторно-импульсного пуска и оценка полученных результатов

Моделирование проводили в среде Matlab Simulink, в качестве двигателя использовали модель синхронного двигателя, имеющего параметры в 6 кВ и 1 МВт; кратность пускового тока — 7; кратность пускового момента — 1,4; КПД — 93,3%.

Осциллограммы угловой скорости (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске без промежуточных трансформаторов изображены на рис. 4, а с промежуточными трансформаторами — на рис. 5.

На основании полученных осциллограмм скорости составлена сравнительная таблица качественных показателей.

Осциллограммы фазных токов статора (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске без промежуточных трансформаторов и с ними представлены на рис. 6, 7.

Качественные показатели переходного процесса скорости

Параметры	Без промежуточных трансформаторов	С промежуточными трансформаторами
Время регулирования $t_{пер}$, с	1,50	2,20
Перерегулирование σ , %	4,96	6,94
Время достижения максимума t_{max} , с	1,41	2,02
Время нарастания t_n , с	1,38	1,99

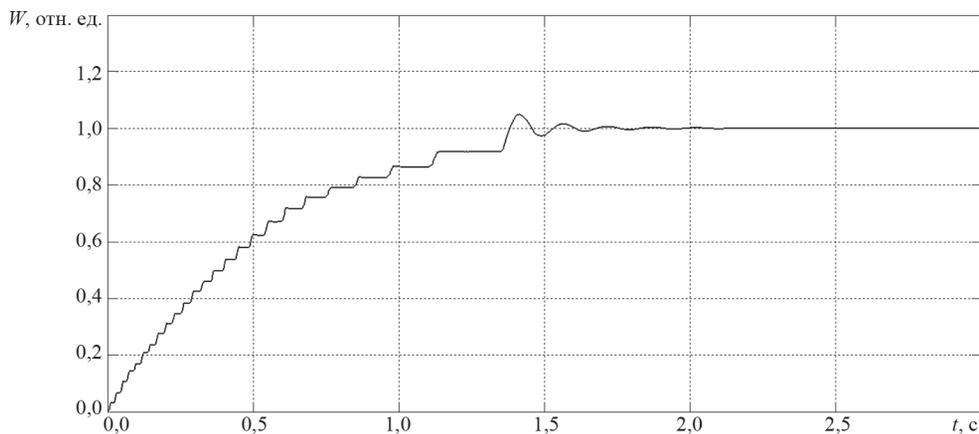


Рис. 4. Осциллограмма угловой скорости (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске без промежуточных трансформаторов

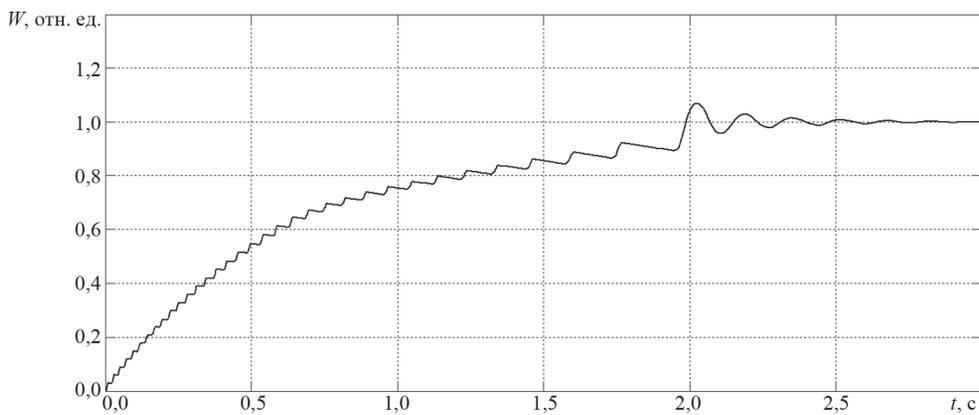


Рис. 5. Осциллограмма угловой скорости (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске с промежуточными трансформаторами

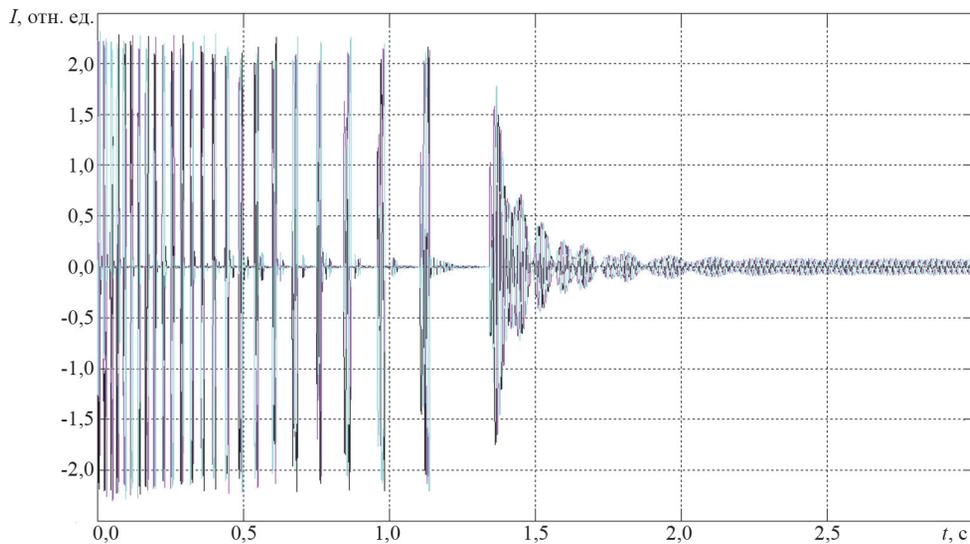


Рис. 6. Осциллограмма фазных токов статора (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске без промежуточных трансформаторов

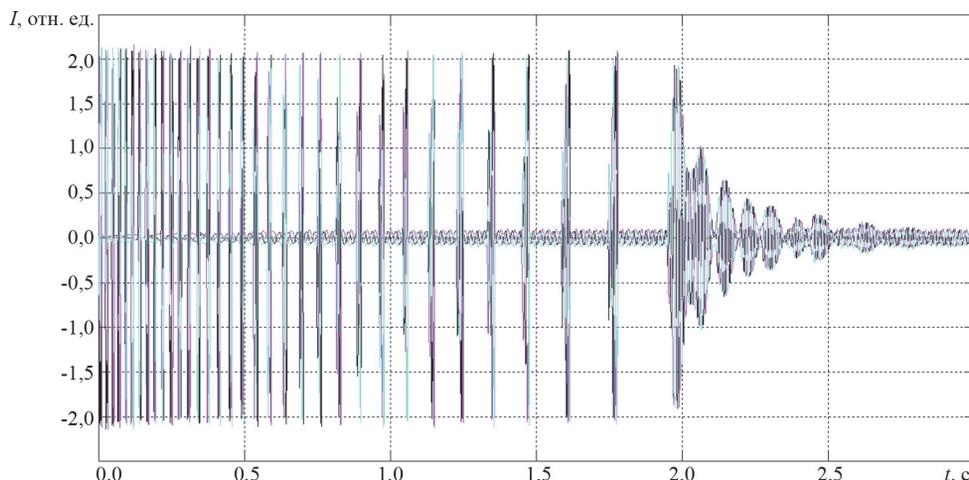


Рис. 7. Осциллограмма фазных токов статора (в относительных единицах) синхронного двигателя при векторно-импульсном пуске с промежуточными трансформаторами

Очевидно, что промежуточные трансформаторы незначительно ухудшают процесс разгона синхронного двигателя, а именно в системе с промежуточными трансформаторами время регулирования увеличилось на 0,7 с (31,8%), перерегулирование возросло на 1,98%, время достижения максимума и нарастания увеличились на 0,61 с (30,3%). Из осциллограмм фазных токов статора следует, что величина пусковых токов не превышает удвоенного значения номинального тока двигателя.

Безусловно, внедрение в цепь промежуточных трансформаторов приведёт к снижению КПД системы.

Литература

1. Басков С.Н., Давыдкин М.Н. Векторно-импульсный способ пуска синхронного двигателя // Наука и производство Урала. 2008. № 2. С. 7—11.
2. Басков С.Н., Радионов А.А., Святых А.Б. Применение векторно-импульсного способа для пуска двигателей переменного тока // Электротехника. 2013. № 10. С. 30—34.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2008.
4. Валов А.В., Усынин Ю.С. Импульсно-векторное управление асинхронным двигателем с фазным ротором // Силовая электроника: Науч. труды XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. М., 2008. С. 20—24.
5. Давидян Ж.Д. Динамические и переходные режимы при импульсном пуске синхронных двигателей // Электротехника. 2008. № 8. С. 52—57.
6. Sawa T. Sensorless Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Motor from Initial States // IEEE Trans. Industry Appl. 2003. V. 39. Pp. 761—767.
7. Sawamura M. Sensorless Drive of SMPM Motor by High Frequency Signal Injection // Proc. Appl. Power Electronics Conf. and Exposition. 2002. V. 1. Pp. 279—285.

Согласно [24], влияние промежуточных трансформаторов уменьшает КПД системы на 3...4% при пуске двигателя.

Таким образом, использование предлагаемой системы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с ограничением пусковых токов с экономической точки зрения целесообразно для электропривода с синхронным электродвигателем мощностью от 1,5 МВт в процессе пуска электродвигателя. В дальнейшем электродвигатель может эксплуатироваться напрямую от сети.

References

1. Baskov S.N., Davydkin M.N. Vektorno-impul'snyy Sposob Puska Sinkhronnogo Dvigatelya. Nauka i Proizvodstvo Urala. 2008;2:7—11. (in Russian).
2. Baskov S.N., Radionov A.A., Svyatykh A.B. Primenenie Vektorno-impul'snogo Sposoba dlya Puska Dvigatelye Peremennogo Toka. Elektrotehnika. 2013;10: 30—34. (in Russian).
3. Vinogradov A.B. Vektornoe Upravlenie Elektroprivodami Peremennogo Toka. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskij Un-t im. V.I. Lenina, 2008. (in Russian).
4. Valov A.V., Usynin Yu.S. Impul'sno-vektornoe Upravlenie Asinkhronnym Dvigatелеm s Faznym Rotorom. Silovaya Elektronika: Nauch. Trudy XII Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Studentov i Molodykh Uchenykh. M., 2008:20—24. (in Russian).
5. Davidyan Zh.D. Dinamicheskie i Perekhodnye Rezhimy pri Impul'snom Puske Sinkhronnykh Dvigatelye. Elektrotehnika. 2008;8:52—57. (in Russian).
6. Sawa T. Sensorless Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Motor from Initial States. IEEE Trans. Industry Appl. 2003;39:761—767.
7. Sawamura M. Sensorless Drive of SMPM Motor by High Frequency Signal Injection. Proc. Appl. Power Electronics Conf. and Exposition. 2002;1:279—285.

8. **Pastorelli M.** Cross-saturation Effects in IPM Motors // IEEE Trans. Industry Appl. 2007. V. 40. No. 6. Pp. 1516—1522.
9. **Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С.** Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей // Вестник ИГЭУ. 2013. № 1. С. 57—61.
10. **Петушков М.Ю.** Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2015.
11. **Усынин Ю.С., Валов А.В., Козина Т.А.** Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением // Электротехника. 2011. № 3. С. 15—19.
12. **Pat. № 2411629 РФ.** Многоуровневый транзисторный преобразователь частоты для управления электродвигателями переменного тока / В.Д. Шепелин и др. // Бюл. изобрет. 2011. № 4.
13. **Ключев В.И.** Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.
14. **Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004.
15. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008.
16. **Герман-Галкин С.Г.** Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона. Век, 2008.
17. **Басков С.Н., Литсин К.В., Радионов А.А.** Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме векторно-импульсного пуска // Вести высш. учеб. заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 3—8.
18. **Давыдкин М.Н.** Разработка системы векторно-импульсного управления пуском синхронного электродвигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2010.
19. **Фокеев А.Е.** Исследование силовых трансформаторов при несинусоидальных режимах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2012.
20. **Басков С.Н., Литсин К.В.** Моделирование системы с промежуточными трансформаторами при векторно-импульсном пуске двигателя переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 2 (23). С. 32—35.
21. **Литсин К.В. и др.** Исследование положения вектора потокосцепления ротора при векторно-импульсном пуске // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия «Энергетика». 2012. Вып. 18. № 37 (296). С. 68—72.
22. **Baskov S.N., Litsin K.V.** Determination of the Angular Position of the Rotor of Asynchronous Motor by Connecting a High-frequency Signal in the Excitation Winding // Proc. Intern. Siberian Conf. Control and Communications. Omsk, 2015. Pp. 137—140.
8. **Pastorelli M.** Cross-saturation Effects in IPM Motors. IEEE Trans. Industry Appl. 2007;40; 6:1516—1522.
9. **Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S.** *Vozmozhnosti Transformatorno-tiristornoy Struktury kak Puskovogo Ustroystva Vysokovol'tnykh Asinkhronnykh Dvigatelye.* Vestnik IGEU. 2013;1:57—61. (in Russian).
10. **Petushkov M.Yu.** *Povyshenie Resursoeffektivnosti Ekspluatatsiya Vysokovol'tnykh Asinkhronnykh Elektroprivodov: Avtoref. Dis. ... Dokt. Tekhn. Nauk.* Magnitogorsk: Magnitogorskiy Gos. Tekhn. Un-t im. G.I. Nosova, 2015. (in Russian).
11. **Usynin Yu.S., Valov A.V., Kozina T.A.** *Asinkhronnyy Elektroprivod s Impul'sno-vektornym Upravleniem.* Elektrotehnika. 2011;3:15—19. (in Russian).
12. **Pat № 2411629 RF.** *Mnogourovnevyy Tranzistornyy Preobrazovatel' Chastoty dlya Upravleniya Elektrodvigatelyami Peremennogo Toka / V.D. Shepelin i dr.* Byul. Izobret. 2011;4. (in Russian).
13. **Klyuchev V.I.** *Teoriya Elektroprivoda.* M.: Energoatomizdat, 1998. (in Russian).
14. **Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N.** *Energoberegayushchiy Asinkhronnyy Elektroprivod.* M.: Akademiya, 2004. (in Russian).
15. **Chernykh I.V.** *Modelirovanie Elektrotekhnicheskikh Ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink.* M.: DMK Press, 2008. (in Russian).
16. **German-Galkin S.G.** *Proektirovanie Mekhatronnykh Sistem na PK.* SPb.: Korona. Vek, 2008. (in Russian).
17. **Baskov S.N., Litsin K.V., Radionov A.A.** *Opre-delenie Uglovogo Polozheniya Ratora Sinkhronnogo Dvigatelya v Rezhime Vektorno-impul'snogo Puska.* Vesti Vyssh. Ucheb. Zavedeniy Chernozem'ya. 2014;4:3—8. (in Russian).
18. **Davydkin M.N.** *Razrabotka Sistemy Vektorno-impul'snogo Upravleniya Puskom Sinkhronnogo Elektrodvigatelya: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk.* Magnitogorsk: Magnitogorskiy Gos. Tekhn. Un-t im. G.I. Nosova, 2010. (in Russian).
19. **Fokeev A.E.** *Issledovanie Silovykh Transformatorov pri Nesinusoidal'nykh Rezhimakh: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk.* Izhevsk: IzhGTU im. M.T. Kalashnikova, 2012. (in Russian).
20. **Baskov S.N., Litsin K.V.** *Modelirovanie Sistemy s Promezhutochnymi Transformatorami pri Vektorno-impul'snom Puske Dvigatelya Peremennogo Toka.* Elektrotekhnicheskie Sistemy i Kompleksy. 2014;2 (23):32—35. (in Russian).
21. **Litsin K.V. i dr.** *Issledovanie Polozheniya Vektora Potokostsepleniya Ratora Pri Vektorno-impul'snom Puske.* Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gos. Un-ta. Seriya «Energetika». 2012;18;37 (296):68—72. (in Russian).
22. **Baskov S.N., Litsin K.V.** *Determination of the Angular Position of the Rotor of Asynchronous Motor by Connecting a High-frequency Signal in the Excitation Winding.* Proc. Intern. Siberian Conf. Control and Communications. Omsk, 2015:137—140.

23. **Басков С.Н., Литсин К.В.** Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора синхронного двигателя // Машиностроение. 2013. № 1. С. 28—33.

24. **Baskov S.N., Litsin K.V.** Research of Vector-pulse Start System of Synchronous Motor with Intermediate Transformer and Sensorless Determination of Angular Rotor Position with Mathematical Methods // Proc 2nd Intern. Conf. Industrial Eng., Appl. and Manufacturing. Chelyabinsk, 2016. Pp. 1—4.

23. **Baskov S.N., Litsin K.V.** Vysokochastotnaya Inzhektsiya Signalov pri Bezdatchikovom Metode Opredeleniya Uglovogo Polozheniya Rotora Sinkhronnogo Dvigatelya. Mashinostroenie. 2013;1:28—33. (in Russian).

24. **Baskov S.N., Litsin K.V.** Research of Vector-pulse Start System of Synchronous Motor with Intermediate Transformer and Sensorless Determination of Angular Rotor Position with Mathematical Methods. Proc 2nd Intern. Conf. Industrial Eng., Appl. and Manufacturing. Chelyabinsk, 2016:1—4.

Сведения об авторах:

Литсин Константин Владимирович — кандидат технических наук, доцент Новотроицкого филиала НИТУ «МИСиС», e-mail: k.litsin@rambler.ru

Басков Сергей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации Южно-Уральского государственного университета, e-mail: s.baskov@mail.ru

Information about authors:

Litsin Konstantin V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Branch of NUST «MISIS» in Novotroitsk, e-mail: k.litsin@rambler.ru

Baskov Sergey N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Mechatronics and Automation Dept., South Ural State University, e-mail: s.baskov@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 07.08.2018

The article received to the editor: 07.08.2018