

УДК 621.316.761, 62-533.6

И.А. Хайченко, В.В. Бабенко, Ю.В. Нефедов, Ань Ту Ха

## Алгоритм снижения дополнительных потерь в асинхронных электроприводах на производствах со статическими регуляторами мощности

Рассмотрены пути снижения потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий, содержащих мощные полупроводниковые преобразователи и асинхронные двигатели. Определен источник дополнительных потерь электроэнергии, связанный с субгармоническим характером колебаний напряжения от работы преобразователей, использующих принцип частотно-импульсного управления. Предложен алгоритм работы тиристорных ключей полупроводниковых преобразователей, который обеспечивает снижение потерь электроэнергии в асинхронных двигателях, подключенных параллельно с мощными преобразователями. Показаны графики напряжений и токов имитационной модели в режимах работы преобразователей, позволяющих повысить энергетическую эффективность работы широкого круга промышленных объектов с асинхронными электродвигателями, имеющими параллельно подключенную, циклически изменяющуюся нагрузку.

**Ключевые слова:** потери электроэнергии, асинхронный электродвигатель, полупроводниковый преобразователь, алгоритм управления, тиристорные ключи, электромагнитная совместимость.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-4-93-98

В соответствии с Федеральным законом № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», в Российской Федерации были созданы правовые, экономические и организационные основы стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1]. В том числе были проведены широкомасштабные мероприятия энергетического аудита практически всех производств и организаций с существенным потреблением энергоресурсов. Анализ результатов энергетического обследования ряда крупных промышленных предприятий г. Воронежа, проведенного в 2013–2016 гг., позволил выявить нетипичный эффект повышения потерь электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) производств, содержащих мощные полупроводниковые (тиристорные) регуляторы и асинхронные двигатели (АД). Актуальность данной проблемы трактуется достаточно широким применением полупроводниковых преобразовательных устройств на современных энергоемких предприятиях. По результатам энергетического аудита, наибольший эффект был отмечен на производствах деревообработки, в цехах механической и термической обработки металла, на предприятиях по выпуску полимерно-композитных материалов. Все отмеченные выше производства, как правило, содержали станки, прессы, печи, краны, вентиляторы, компрессоры с асинхронными электроприводами, а также полупроводниковые регуляторы мощности (тиристорные регуляторы для термоэлектрических нагревателей, управляемые выпрямители для гальванических ванн и т.п.). Было отмечено два характерных фактора:

- полупроводниковые регуляторы мощности в алгоритме коммутации тиристорных ключей использовали принцип частотно-импульсной модуляции (ЧИМ);
- питающие трансформаторы цеховых подстанций не имели достаточного запаса по мощности.

Проведенные в соответствии с пятилетним регламентом повторные замеры основных параметров энергопотребления указанных выше объектов предприятий показали недостаточную эффективность проведенных типовых энергосберегающих мероприятий.

Была поставлена задача определения причин локального повышения потерь в АД рассматриваемых промышленных объектов и эффективных путей их снижения.

Для ее решения применены метод системного анализа режимов функционирования конкретного силового оборудования (с учетом технологических требований) и его основных энергетических параметров, а также метод имитационного моделирования. Как показали исследования, вышеуказанное силовое оборудование рассматриваемых производств было выбрано правильно и работало в штатных технологических режимах. Таким образом, дополнительные потери могли возникнуть по причине несоблюдения норм качества электроснабжения. Однако такие показатели, как медленные изменения напряжения, несинусоидальность, несимметрия напряжения, соответствовали нормативным показателям [2]. В то же время присутствовал эффект периодического колебания напряжения, вызванный просадкой напряжения питания асинхронных двигателей при коммутации мощных потребителей (например, термоэлектрических нагревателей ТЭН). Для реализации технологических требований управления уровнем нагрева рассматриваемых ТЭН, использовались тиристорные регуляторы мощности (ТРМ), работающие на принципе ЧИМ: изменение количества периодов (обычно от одного до десяти) открытого состояния тиристорных ключей в фазах. Так как трансформаторы цеховых подстанций не имели большого запаса по мощности, то включение большой нагрузки один раз в каждые 10 периодов напряжения сопровождалось существенным (6–15%

для обследованных объектов) снижением напряжения питания на других потребителях (в том числе на АД) и последующим ростом дополнительных потерь электроэнергии [3–6]. Но подобный эффект по параметрам своей продолжительности и частоты ( $t = 0,01–0,09$  с;  $f = 5$  Гц), не подпадает под такие нормируемые показатели, как колебания напряжения, одиночные быстрые изменения напряжения и фликер [7].

Решения данной проблемы, как правило, находятся в двух направлениях:

- реализация более мощной цеховой СЭС или установка быстродействующих локальных устройств стабилизации уровня напряжения;

- реализация такого алгоритма работы ТРМ, при котором может быть существенно снижен уровень дополнительных потерь в АД.

Первое направление характерно для мирового промышленного опыта повышения уровня энергоэффективности, при условиях избыточности энергетических ресурсов и больших финансовых возможностях по закупке и установке дополнительного оборудования (либо силовых стабилизаторов, либо более мощного трансформаторного оборудования даже с учетом возможного роста сопутствующих потерь электроэнергии в режимах неполной загрузки трансформатора). Для отечественных производств такой путь трудно реализовать в условиях ограничения вышеуказанных ресурсов.

Поэтому для отечественных промышленных предприятий второе направление представляется более эффективным и менее затратным, так как касается изменений только системы управления типовых ТРМ. Для его реализации было предложено алгоритмическое решение.

Суть его заключается в плавном снижении электрической мощности, передаваемой на ТЭН. Этот эффект можно получить путем реализации частичного импульсно-фазового управления (ИФУ) (в тех случаях, когда вопрос электромагнитной совместимости, по уровню генерации высших гармонических, не критичен) [8–11]. Тем более, что многие ТРМ предусматривают работу с таким алгоритмом коммутации тиристорных ключей.

Для определения основных параметров алгоритма коммутации тиристорных ключей ТРМ и количественной оценки достигаемого при этом эффекта снижения потерь был применен метод имитационного моделирования в программной среде MatLab Simulink [12–15]. Базовые расчетные данные соответствуют обследованному предприятию обработки древесины, содержащему три столярных цеха, две сушильные камеры, склад готовой продукции.

От силового трансформатора ТМ-630/10 ( $U_{ВН} = 10$  кВ,  $U_{НН} = 0,4$  кВ; схема соединения  $\Delta/Y0$ ) питаются цеховые радиально-пылевой вентилятор ( $P = 45$  кВт), пилорама, кран-балка, станки (форматно-раскроечный, четырехсторонний станок, фуговальный, калибровально-шлифовальный станок, сверлильно-присадочный, фрезерный, кромкообли-

цовочный, шипорезный с суммарной асинхронной нагрузкой 50 кВт), две группы ТЭН (мощностью  $2 \times 260$  кВт) сушильных камер, уровень нагрева которых регулируется ТРМ типа REVO-M-2PH-500A.

В разработанной имитационной модели (функциональная схема представлена на рис. 1) реализованы и исследованы режимы работы асинхронной нагрузки (вентилятора и всех основных асинхронных цеховых двигателей, подключенных к низковольтному выходу питающего трансформатора и представленных эквивалентным АД) и регулируемых по мощности ТЭН сушильных камер.

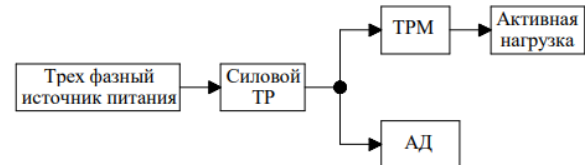


Рис. 1. Функциональная схема имитационной модели основных потребителей электроэнергии производственного объекта

Имитационная модель включает в себя трехфазный источник питания, силовой трансформатор фиксированной мощности, к которому подключена активная нагрузка, управляемая ТРМ, а также асинхронная нагрузка АД. В данной модели производится анализ потребляемой активной и реактивной мощности, напряжений, среднеквадратичных значений фазных токов и их гармонического состава с помощью блоков измерения параметров. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ТДН определялось в процессе моделирования с помощью данных программного блока измерения гармонического состава Fast fourier transform.

В имитационной модели ТРМ реализована работа двух режимов коммутации тиристорных ключей: ЧИМ и ИФУ (рис. 2).

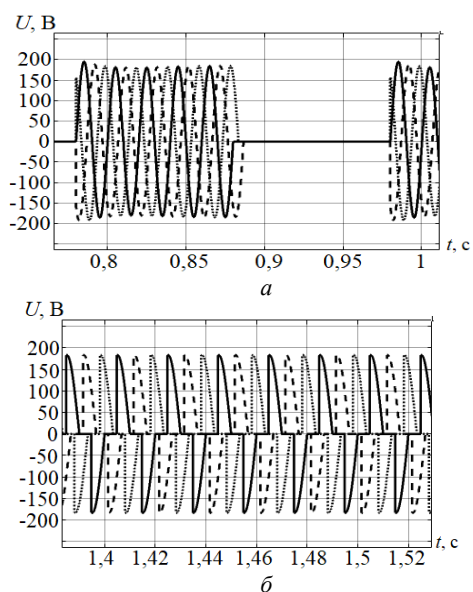


Рис. 2. Диаграммы фазных напряжений на ТЭН при алгоритме работы тиристорных ключей ЧИМ (а) и ИФУ (б), режим 50% нагрузки ТЭН

В рассматриваемых сушильных установках ТРМ работали только в режиме ЧИМ. Регулировалась скважность при тактовом периоде  $T = 0,02 \times 10 = 0,2$  с (10 интервалов). На рис. 3, для примера, рассмотрен режим 80% нагрузки ТЭН.

Из анализа графиков напряжения и тока (см. рис. 3) можно сделать вывод о возникновении переходных процессов в моменты включения и отключения тиристорных ключей ТРМ с периодичностью 0,2 с. При этом колебания уровня напряжения на входе АД имеют субгармоническую частоту  $f = 5$  Гц.

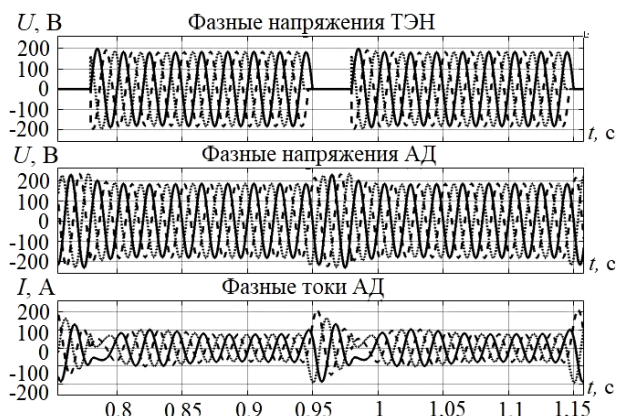


Рис. 3. Графики фазных напряжений и токов ТЭН и АД при работе ТРМ в режиме ЧИМ

Процесс включения ТЭН сопровождается падением уровня напряжения на АД на 10–15%, снижением скорости двигателя на 2–5%, что можно признать несущественным фактором для производительности асинхронных электроприводов.

Выключение тиристорными ключами ТРМ нагрузки приводит к существенному повышению напряжения и тока АД. Причем переходный процесс фазного тока АД имеет значительный показатель перерегулирования по амплитуде ( $I_{\max} = 1,5\text{--}2,5 I_{\text{ном}}$ ). Это, по сути, пусковой режим длительностью в три, четыре периода, который сопровождается дополнительными потерями электроэнергии, перегревом и старением изоляции. И если значения последних двух факторов можно считать несущественными (учитывая уровень переходных токов и их длительность), то учет дополнительных потерь видится необходимым согласно исследованиям [16–19]. Проведенная на основании последних интегральная оценка значений фазных токов (а следовательно, и среднеквадратичные цикловые потери энергии при рассмотренных параметрах имитационной модели и технологического процесса сушки древесины) позволяет усредненно определить увеличение дополнительных потерь в двигателях на 15–23%.

Алгоритм снижения уровня дополнительных потерь в АД предполагает ступенчатое (в течение последних 2–4 периодов открытого состояния тиристорных ключей ТРМ) снижение электрической мощности, передаваемой на ТЭН. Такое снижение возможно реализовать с помощью модернизированной системы управления (СУ) ТРМ, используя

штатный режим ИФУ. На рис. 4 показана блок-схема СУ ТРМ.

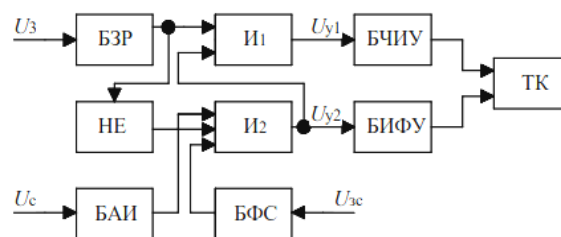


Рис. 4. Блок-схема СУ ТРМ

Регулирование мощности ТЭН производится в соответствии с уровнем сигнала задания  $U_3$  блоками БЗР (блок задания режима) и БЧИУ (блок частотно-импульсного управления). Реализация ступенчатого снижения мощности ТЭН каждые 10 периодов сетевого напряжения  $U_c$  осуществляется блоком БФС (блок формирования ступенчатости) в соответствии с заданием количества и углов управления ступеней  $U_{3c}$ , с учетом контроля уровня искажения напряжения посредством блока анализа искажений напряжения БАИ. Элементы логики  $I_1, I_2, HE$  обеспечивают невозможность одновременной работы тиристорных ключей ТК в режимах ЧИМ и ИФУ.

При этом предполагается задавать углы управления (моменты открытия ТК) с нарастающим уровнем (например, для трех последних периодов – 60, 110, 140°). Такой алгоритм приводит к плавному возрастанию напряжения на АД без существенного перерегулирования фазных токов (до  $I_{\max} = 1,2\text{--}1,7 I_{\text{ном}}$ ) и, соответственно, снижению потерь в АД (до 8–12%), повышению надежности АД и времени его наработки на отказ (рис. 5).

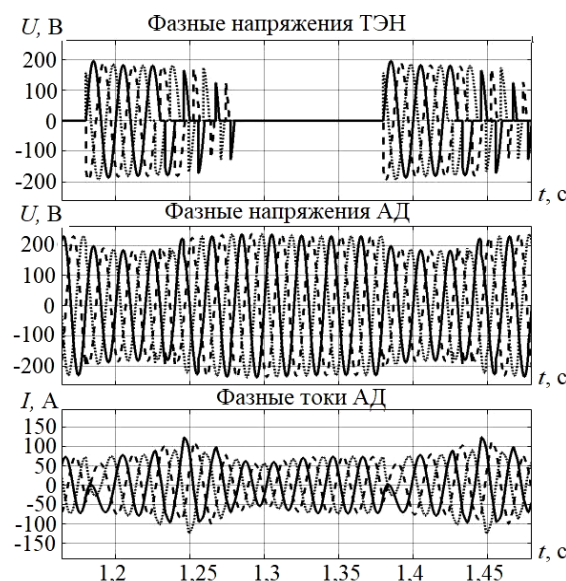


Рис. 5. Графики фазных напряжений и токов ТЭН и АД радиально-пылевого вентилятора при работе ТРМ в режиме снижения уровня переходных токов

Данный выбор углов регулирования трактовался обеспечением минимальных искажений формы напряжения. Он основан на анализе результатов

имитационного моделирования при вариации таких факторов, как количество интервалов сетевого напряжения в тактовом периоде  $T$ , количество интервалов ступенчатого снижения мощности, углы управления тиристорными ключами. Критерием оптимального варианта принимался минимальный уровень дополнительных потерь в АД при нормируемых значениях уровня искажений синусоидальности кривой напряжения питания АД ( $TDH \leq 8\%$ ) [2].

Для рассматриваемого промышленного предприятия (двухсменная работа предприятия со средним одноставочным тарифом  $C_3$ ) среднегодовую экономию электроэнергии можно определить по выражению

$$\Delta = K_{\text{П}} \cdot C_3 \cdot P \cdot t = 320000 \text{ руб.},$$

где  $K_{\text{П}}$  – коэффициент снижения потерь;  $P$  – установленная суммарная мощность асинхронных двигателей;  $C_3 = 5 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$  – региональная стоимость одного кВт·ч активной электроэнергии;  $t$  – время работы силового оборудования.

Следует отметить, что уровень снижения дополнительных потерь электроэнергии возрастает при реализации предложенного алгоритма с увеличенным количеством интервалов сетевого напряжения в тактовом периоде  $T$  (например, 20–50) и количестве интервалов ступенчатого снижения мощности (например, 5–10). Однако такое решение сопряжено с необходимостью полного перепрограммирования контроллеров системы управления тиристорными ключами ТРМ, что не всегда технически возможно.

#### Заключение

1. В результате энергетического обследования ряда производств, содержащих мощные тиристорные регуляторы для термоэлектрических нагревателей, управляемые выпрямители для гальванических ванн и асинхронные двигатели, определен эффект повышения потерь электроэнергии в случае, когда питающие трансформаторы цеховых подстанций не имели достаточного запаса по мощности.

2. Показано, что причиной повышения потерь электроэнергии являются существенные (6–15%) колебания напряжения питания на асинхронных двигателях с частотой  $f = 5 \text{ Гц}$ .

3. Предложено схмотехническое решение на основе дополнительной реализации импульсно-фазового алгоритма работы тиристорных регуляторов мощности.

4. Определено, что для рассмотренных промышленных объектов (питающий цеховой трансформатор  $S = 630 \text{ кВА}$ , асинхронная нагрузка  $P = 95 \text{ кВт}$ , электронагреватели  $P = 520 \text{ кВт}$ ) возможна экономия электроэнергии в асинхронных двигателях около 64 000 кВт·ч (в денежном эквиваленте около 320 000 руб.).

5. Результаты данного исследования могут быть востребованы при решении вопросов повышения энергоэффективности работы асинхронных электроприводов многих промышленных предприятий, имеющих параллельную динамическую (изменяю-

щуюся циклически) нагрузку, вызывающую существенные колебания напряжения.

#### Литература

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/), свободный (дата обращения: 08.12.2020).
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
3. Беляевский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестник Кузбасского гос. тех. ун-та. – 2010. – № 6. – С. 66–69.
4. Hung N.T. Optimization of electric energy in three-phase induction motor by balancing of torque and flux dependent losses / N.T. Hung, N.C. Thien, T.P. Nguyen, V.S. Le, D.A. Tuan // Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. – 2014. – P. 497–507. – doi: 10.1007/978-3-642-41968-3\_50
5. Sun D.S. Research on voltage-chopping and energy-saving controlling technology for three-phase AC asynchronous motor // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 433–440. – P. 1033–1037. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033.
6. Приказ Минэнерго России от 23.06.2015 № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_183610/506efdf4eaaad34c0d082ce111d3da12fa893c1c/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183610/506efdf4eaaad34c0d082ce111d3da12fa893c1c/), свободный (дата обращения: 08.12.2020).
7. ГОСТ 30804.3.11–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 75 А (в одной фазе), подключаемые к низковольтным системам электроснабжения при определенных условиях. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
8. Крысанов В.Н. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки / В.Н. Крысанов, Ю.В. Нефедов, А.В. Романов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 77–81.
9. Wood J.R. Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental evaluation of a diffusion model for the growth and collapse of gas bubbles / J.R. Wood, M.G. Bader // Compos. Manuf. – 1994. – Т. 5(3). – P. 149–158.
10. Крысанов В.Н. Исследование влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронного двигателя / В.Н. Крысанов, А.Б. Кирилов // Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления». – Воронеж: Изд. дом «Кварта», 2014. – № 2. – С. 6–12.
11. Крысанов В.Н. Компьютерное моделирование трехфазных регулируемых асинхронных электроприводов при изменении питающего напряжения / В.Н. Крысанов, А.Б. Кирилов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж: ВГТУ, 2014. – № 4. – С. 109–112.

12. Джендубаев А.Р. MATLAB, Simulink и SimPower-Systems в электроэнергетике / А.Р. Джендубаев, И.И. Алиев. – М.: Наука, 2015. – 210 с.
13. Терёхин В.Б. Моделирование электропривода в SIMULINK (MATLAB 7.0.1) / В.Б. Терёхин. – Томск: НИ ТПУ, 2010. – 110 с.
14. Atif Iqbal, Haitham Abu-Rub, Jaroslaw Guzinski. High performance control of AC drives with matlab // Simulink models. – Wiley. – 2018. – P. 502.
15. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: КОРОНА-принт, 2001. – 320 с.
16. Dogan M. Reduction of asynchronous motor loss by heuristic methods (PSO-GA) / M. Dogan, M. Dursun // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2012. – No. 1(117). – P. 53–58.
17. Ovcharov S. Ways to reduce energy consumption in mobile units / S. Ovcharov, A Vovk // Praci Tavria State Agro-technological University. – 2013. – No. 13 (4). – P. 21–26.
18. Svinkunas G. Simulation of frequency converters operation in industrial power net / G. Svinkunas, K. Medvedev // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, – 2012. – No. 1 (117). – P. 65–70.
19. Yeh C.C. Fault-tolerant soft starter control of induction motors with reduced transient torque pulsation / C.C. Yeh, N.A.O. Demerdash // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2009. – Vol. 24, Is. 4. – P. 848–859.

#### Хайченко Илья Александрович

Аспирант каф. электропривода, автоматизации и управления в технических системах (ЭАУТС)  
Воронежский государственный технический ун-т (ВГТУ)  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7-952-433-26-05  
Эл. почта: li740@yandex.ru

#### Бабенко Владимир Владимирович

Аспирант каф. ЭАУТС ВГТУ  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7-915-540-88-73  
Эл. почта: vova.babenko.94@mail.ru

#### Неведов Юрий Васильевич

Аспирант каф. ЭАУТС ВГТУ  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7-906-673-44-40  
Эл. почта: nefedowjuriy@yandex.ru

#### Ха Ань Ту

Аспирант каф. ЭАУТС ВГТУ  
Московский проспект, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7-951-850-41-66  
Эл. почта: haanhtu2509ru@gmail.com

#### Khaychenko I.A., Babenko V.V., Nefedov Yu.V., Anh Tu Ha Algorithm for reducing additional losses in asynchronous electric drives in plants with static power regulators

The ways to reduce losses of electrical energy in power supply systems of industrial enterprises containing powerful semiconductor converters and asynchronous motors are considered. The source of additional electric power losses related to subharmonic nature of voltage fluctuations from operation of

converters using the principle of frequency-pulse control is determined. The operation algorithm for thyristor switches of semiconductor converters is proposed, that provides reduction of electric power losses in asynchronous motors connected in parallel with powerful converters. The voltage graphs and currents of simulation model in operation modes of converters show the potential to increase energy efficiency of operation of a wide range of industrial objects with asynchronous motors, connected in parallel and having cyclically changing load.

**Keywords:** power losses, asynchronous electric motor, semiconductor converter, control algorithm, thyristor keys, electromagnetic compatibility.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-4-93-98

#### References

1. Federal Law «On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency, and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation» dated 23.11.2009 № 261-ФЗ. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/) (Accessed: December 08, 2020) (in Russ.).
2. GOST 32144-201. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [GOST 32144–2013. Electric power. The compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of electric power supply in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 16 p. (in Russ.).
3. Belyaevskii, R.V. Analysis of the effect of asynchronous engine load factor on reactive power consumption. *Vestnik Kuzbasskogo gos. tekhn. univ.*, 2010, no. 6, pp. 66–69 (in Russ.).
4. Hung, N.T., Thien N.C., Nguyen T.P., Le V.S., Tuan D.A. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses. Recent Advances, *Electrical Engineering and Related Sciences*, 2014, pp. 497–507. doi: 10.1007/978-3-642-419683\_50.
5. Sun D.S. Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor. *Advanced Materials Research*, 2012, no. 433–440, pp. 1033–1037. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033.
6. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 23.06.2015 № 380 «On the Procedure for Calculating the Ratio of Consumption of Active and Reactive Power for Individual Energy Receiving Devices (Groups of Energy Receiving Devices) of Electric Energy Consumers». Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_183610/506efdf4eaaad34c0d082ce111d3da12fa893c1c/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183610/506efdf4eaaad34c0d082ce111d3da12fa893c1c/) (Accessed: December 08, 2020) (in Russ.).
7. GOST 30804.3.11–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmesti-most' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kolebaniya napryazheniya i fliker, vyzyvayemye tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 75 A (v odnoi faze), podklyuchaemye k nizkovol'nym sistemam elektrosnabzheniya pri opredelennykh usloviyakh* [GOST 30804.3.11–2013. Electric power. The compatibility of technical means is electromagnetic. Voltage fluctuations and flicker caused by technical media with a current consumption of not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage electric supply systems under certain conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 12 p. (in Russ.).
8. Krysanov V.N., Nefedov Yu.V., Romanov A.V. Monitoring of electromagnetic compatibility parameters of upgraded autoclave plant equipment. *Vestnik Voronezhskogo gos-*

darstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 77–81 (in Russ.).

9. Wood J.R., Bader M.G. Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental evaluation of a diffusion model for the growth and collapse of gas bubbles. *Compos. Manuf.*, 1994, vol. 5 (3), pp. 149–158.

10. Krysanov V.N., Kirilov A.B. Investigation of influence of supply voltage nonsinusoidity on energy characteristics of asynchronous motor. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*, 2014, no. 2, pp. 6–12 (in Russ.).

11. Krysanov V.N., Kirilov A.B. Computer simulation of three-phase adjustable asynchronous electric drives at change of supply voltage. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 4, pp. 109–112 (in Russ.).

12. Dzhendubaev A.R., Aliev I.I. MATLAB, *Simulink i SimPowerSystems v elektroenergetike* [Simulink and SimPowerSystems in the Power Industry]. M., Nauka, 2015, 210 p. (in Russ.)

13. Terekhin V.B. *Modelirovanie elektrivoda v SIMULINK (MATLAB 7.0.1)* [Simulation of electric drive in SIMULINK (MATLAB 7.0.1)]. Tomsk, NITPU, 2010, 110 p. (in Russ.).

14. Atif Iqbal, Haitham Abu-Rub, Jaroslaw Guzinski. *High Performance Control of AC Drives with Matlab. Simulink models*, Wiley, 2018, 502 p.

15. German-Galkin, S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer modeling of semi-conductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg, KORONA print, 2001, 320 p. (in Russ.).

16. Dogan M., Dursun M. Reduction of Asynchronous Motor Loss by Heuristic Methods (PSO-GA). *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, no. 1(117), pp. 53–58.

17. Ovcharov S., Vovk A. Ways to reduce energy consumption in mobile units. *Praci Tavria State Agro-technological University*, 2013, no. 13 (4), pp. 21–26.

18. Svinkunas G., Medvedev K. Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, no. 1(117), pp. 65–70.

19. Yeh C.C., Demerdash N.A.O. Fault-Tolerant Soft Starter Control of Induction Motors with Reduced Transient Torque Pulsation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, vol. 24. no. 4, pp. 848–859.

---

#### **Ilya A. Khaychenko**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-952-433-26-05  
Email: li740@yandex.ru

#### **Vladimir V. Babenko**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-915-540-88-73  
Email: vova.babenko.94@mail.ru

#### **Yurij V. Nefedov**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-906-673-44-40  
Email: nefedowjurij@yandex.ru

#### **Anh Tu Ha**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-951-850-41-66  
Email: haanhtu2509ru@gmail.com