

5. Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. Changes in the structure of martensite of iron-nickel alloys under the action of thermal shotblast treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2001. Т. 43. № 11-12. С. 438-439.
6. Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А. Преимущества вакуумной цементации и проблемы ее промышленного применения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 8. С. 37-43.
7. Рыжов Н.М., Гуляев А.А., Пахомова С.А. Структура и контактная выносливость цементованной стали 12Х2Н4Ф после поверхностного пластического деформирования // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 1986. № 3. С. 30.
8. Пахомова С.А. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочных сталей // Тяжелое машиностроение. 2009. № 10. С. 35-38.
9. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization // Solid State Phenomena. 2016. Т. 870. С. 383-391.
10. Рыжов Н.М., Пахомова С.А. Эффективность теплового дробеударного упрочнения цементованных сталей // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 1994. № 5. С. 21.
11. Пахомова С.А., Рыжов Н.М., Васильев В.Р. Изменение субструктуры мартенсита железоникелевых сплавов под воздействием тепловой дробеударной обработки / Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2001. № 11. С. 29-31.
12. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения теплостойких сталей // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 1. С. 17-20.
13. Федорова Л.В., Федоров С.К., Иванова Ю.С., Сидоренко В.В. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка стали 8620. Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №8, С. 39-43.

УДК 621.314.57: 62.83

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ

М.Ю. Пустоветов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика, автоматика и системы коммуникаций», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Аннотация. В работе проведено теоретическое исследование посредством математического моделирования на ЭВМ влияния параметров звена постоянного напряжения преобразователя частоты на величину потребляемого преобразователем тока. Рассмотрены преобразователи различной мощности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, Г-образный фильтр звена постоянного напряжения, потребляемый ток, заряд.



SIMULATION OF THE INPUT CURRENT OF FREQUENCY CONVERTER DURING TURNING-ON

Mikhail Pustovetov

Ph.D., associate professor, Energy, automation and communication systems department, Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Abstract. The paper deals with a theoretical study by means of computer simulation the effect of the parameters of DC link of frequency converter to the input current of converter. Considered converters of various powers.

Keywords: frequency converter, L-type filter of DC link, input current, charging.

Введение. Автоматизированный электропривод с использованием асинхронных двигателей (АД), питаемых от преобразователей частоты (ПЧ) широко применяется в самых разных отраслях промышленности и транспорта. Кажется, что его характеристики хорошо известны. Но в процессе эксплуатации иногда возникают вопросы, ответы на которые могут быть даны лишь при проведении экспериментов с конкретным оборудованием. К сожалению, в условиях производства далеко не всегда имеется в наличии комплект приборов для соответствующих измерений. Кроме того, технология производства не всегда допускает возможность проведения экспериментов. Современной эффективной заменой физическому эксперименту может служить эксперимент вычислительный, то есть математическое моделирование на адекватной модели объекта исследования [1 - 3]. С сожалением приходится констатировать, что точные и в необходимом объеме данные для построения адекватной математической модели ПЧ доступны далеко не всегда: не всё указано в документации, не любой ПЧ готовы разобирать для выявления параметров его комплектующих. Таким образом, приходится при задании параметров математической модели опираться на закономерности, характерные для ряда ПЧ. Например, известна мощность АД, питаемого от ПЧ, но нет данных о величине C_d и L_d - параметров Г-образного фильтра в звене постоянного напряжения ПЧ. Конечно, в такой ситуации невозможно предоставить заказчику вполне достоверные результаты моделирования, но, зная ориентировочные значения C_d и L_d , можно получить приближенные результаты, не противоречащие физике процессов и здравому смыслу. Одной из интересующих на практике характеристик является величина тока, потребляемого фазой ПЧ при включении.

Цель работы. На одном из кондитерских производств эксплуатируются несколько электроприводов на основе ПЧ и АД. Суммарная установленная мощность группы АД (16 шт.) составляет около 9,3 кВт (входят АД с номинальными мощностями 0,37 кВт, 0,75 кВт и 1,5 кВт). Каждый АД питается от

индивидуального ПЧ. Включение под напряжение группы ПЧ происходит одновременно. Указанная нагрузка питается от одного источника бесперебойного питания (ИБП) мощностью 20 кВА. При этом частотный пуск может стартовать одновременно не более, чем у четырёх АД. Выявлена проблема, заключающаяся в периодическом выходе из строя транзисторов выходного инвертора ИБП. Известно, что максимальный допустимый в длительном режиме ток ИБП составляет 40 А, а перегрузочная способность 200 % гарантируется в течение 0,5 с. Целью работы является выяснение значения суммарного тока фазы, потребляемого группой ПЧ при включении под напряжение. Может ли быть это значение опасным для ИБП?

Материал и результаты исследований. Все рассматриваемые в данном случае ПЧ с явно выраженным звеном постоянного напряжения имеют в своем составе диодный выпрямитель, выполненный по 6-пульсной мостовой схеме; Г-образный фильтр нижних частот, имеющий в продольной ветви индуктивность L_d , а в поперечной – емкость C_d ; транзисторный автономный инвертор напряжения (АИН), выполненный по мостовой схеме (рис. 1). При включении ПЧ под напряжение первоначальный заряд емкости C_d начинается через зарядное сопротивление R , шунтируемое спустя некоторое время, достаточное для достижения напряжением на конденсаторе значения, близкого к номинальному, контактом K , через который происходит дозаряд C_d , по окончании которого можно начинать подачу напряжения питания с АИН на нагрузку. ПЧ питается от симметричного трехфазного источника напряжения с частотой 50 Гц и действующим значением линейного напряжения 380 В.

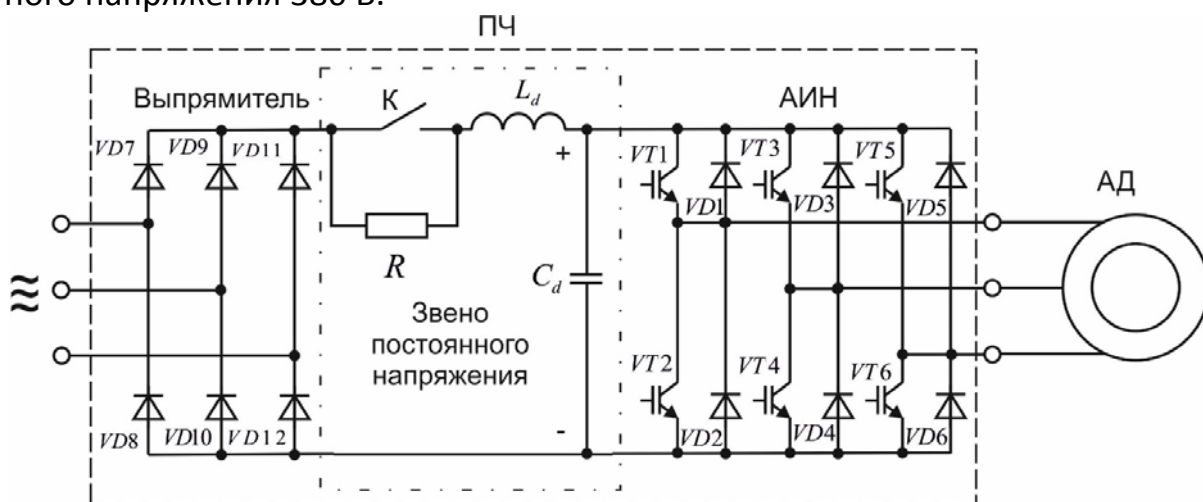


Рисунок 1 – Схема силовой части ПЧ

Чтобы обоснованно задаться значениями C_d и L_d , автор предпринял попытку обобщения некоторого количества известных ему из практики, а

также из каталогов [4, 5] данных. Результаты представлены на рис 2. в виде значений L_d , мГн и удельных значений C_d , мкФ/кВт.

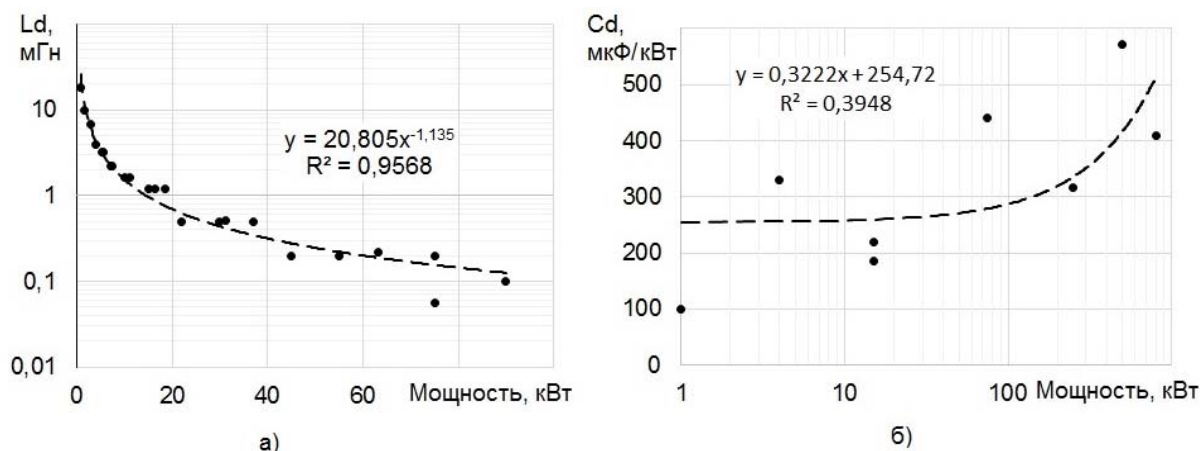


Рисунок 2 – Приближенные зависимости параметров звена постоянного напряжения ПЧ от мощности питаемого АД: а) значение L_d ; б) удельное значение C_d

Согласно рис. 2 б) среднее арифметическое удельное значение C_d составляет 322 мкФ/кВт. На рис. 2 приведены уравнения линий трендов (пунктирных линий), а также величина достоверности аппроксимации линией тренда заданных удельных значений параметров (точки-маркеры) R^2 - коэффициент детерминации, говорящий о том, в какой мере данный тренд объясняет расположение исходных точек.

Дальнейшие результаты получены для случая моделирования включения ПЧ при отсутствии начального заряда на C_d и частотного пуска АД номинальной мощностью 1,5 кВт с нагрузкой на валу типа вентилятора или насоса. Характеристики и параметры АД типа АЭВ 80 В2У2, даны в табл. 1.

В табл. 2 даны характеристики и параметры Г-образного фильтра ПЧ и узла заряда конденсатора, принятые при моделировании. Моделирование проводилось для двух случаев: когда L_d имеется в составе фильтра звена постоянного напряжения ПЧ и когда отсутствует. Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ, сведены в таблицу 3. На рис. 3 показан вид результатов моделирования при наличии L_d от включения питания ПЧ до выхода АД на установившийся режим работы при частоте выходного напряжения АИН 50 Гц.

Таблица 1 - Характеристики и параметры АД типа АЭВ 80 В2У2, использованные при моделировании

Наименование характеристики или параметра	Размерность	Значение
Номинальная мощность	кВт	1,5
Номинальная частота вращения	об/мин	2909
Номинальное линейное напряжение	В	380
Номинальная частота напряжения питания	Гц	50
Активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре 75 °С	Ом	5,63
Приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора при температуре 75 °С	Ом	2,18
Индуктивность рассеяния фазы обмотки статора	Гн	0,0112
Приведенная индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора	Гн	0,00703
Главная индуктивность	Гн	0,3119
Активное сопротивление в ветви намагничивания (включено параллельно главной индуктивности)	Ом	996,6
Приведенный к валу АД момент инерции (с учетом механизма)	кг·м ²	36,6·10 ⁻⁴

Таблица 2 - Характеристики и параметры ПЧ

Наименование характеристики или параметра	Размерность	Значение
Емкость Г-образного фильтра	мкФ	400
Индуктивность Г-образного фильтра (при наличии)	мГн	10
Зарядное сопротивление	Ом	10
Задержка начала замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление, от момента времени подачи напряжения на ПЧ	с	0,01
Длительность замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление	мкс	1
Сопротивление шунтирующего контакта в разомкнутом состоянии	МОм	1
Сопротивление шунтирующего контакта в замкнутом состоянии	Ом	0,001

Таблица 3 - Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ

Наименование характеристики	Размерность	Значение	
		с L_d	без L_d
Мгновенное максимальное напряжение на C_d в процессе заряда	В	548,193	537,834
Мгновенный максимальный ток при заряде C_d через зарядное сопротивление	А	39,131	46,457
Мгновенный максимальный ток при дозаряде C_d через контакт, шунтирующий зарядное сопротивление	А	-10,231	- 134,207
Мгновенный максимальный ток в процессе частотного разгона АД	А	-12,758	49,775
Амплитуда тока в установившемся режиме по окончании разгона АД	А	7,348	44,089
Амплитуда 1-й гармоники тока в установившемся режиме по окончании разгона АД	А	5,927	5,913
THD тока в установившемся режиме по окончании разгона АД (учтены гармоники с частотами до 2000 Гц)	%	7,340	13,056

На рис. 4 приведен начальный фрагмент переходного процесса из рис. 3. Рис. 5 показывает равный по времени начальный фрагмент переходного процесса, но при отсутствии L_d . На рисунках изображены графики: 1 – ток, потребляемый фазой ПЧ, А; 2 – напряжение звена постоянного напряжения ПЧ (уменьшено в 20 раз), В; 3 – частота выходного напряжения АИН (изменено в 0,6 раза), Гц; 4 – частота вращения ротора АД (уменьшено в 100 раз), об/мин.

На рис. 6 и 7 показана полученная в результате моделирования форма тока, потребляемого фазой ПЧ, соответственно при наличии и отсутствии L_d .

Дальнейшие результаты моделирования приводятся для случая наличия L_d . Длительность замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление, сопротивление шунтирующего контакта в разомкнутом состоянии и сопротивление шунтирующего контакта в замкнутом состоянии при-

няты везде такими же, как в табл. 2. Табл. 4 содержит сведения о параметрах и характеристиках моделируемых ПЧ. В табл. 5 показаны результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ при разных мощностях АД.

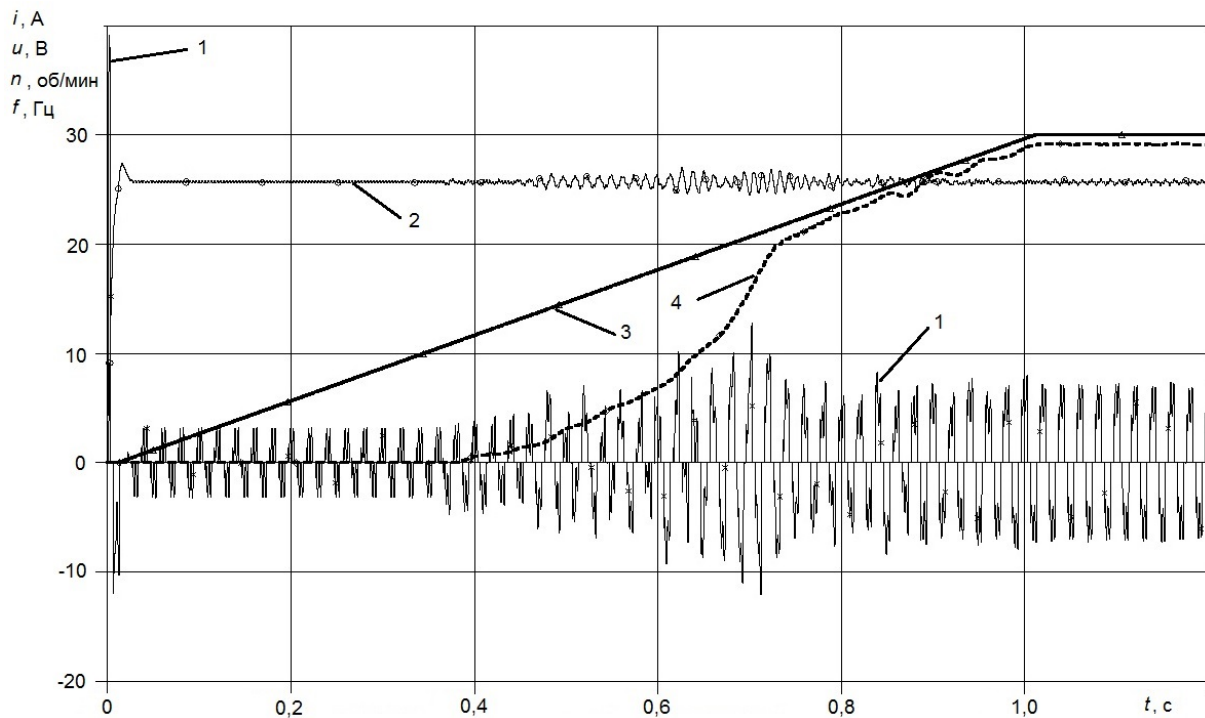


Рисунок 3 – Результаты моделирования при наличии L_d от включения питания ПЧ до выхода АД на установившийся режим работы при частоте выходного напряжения АИН 50 Гц

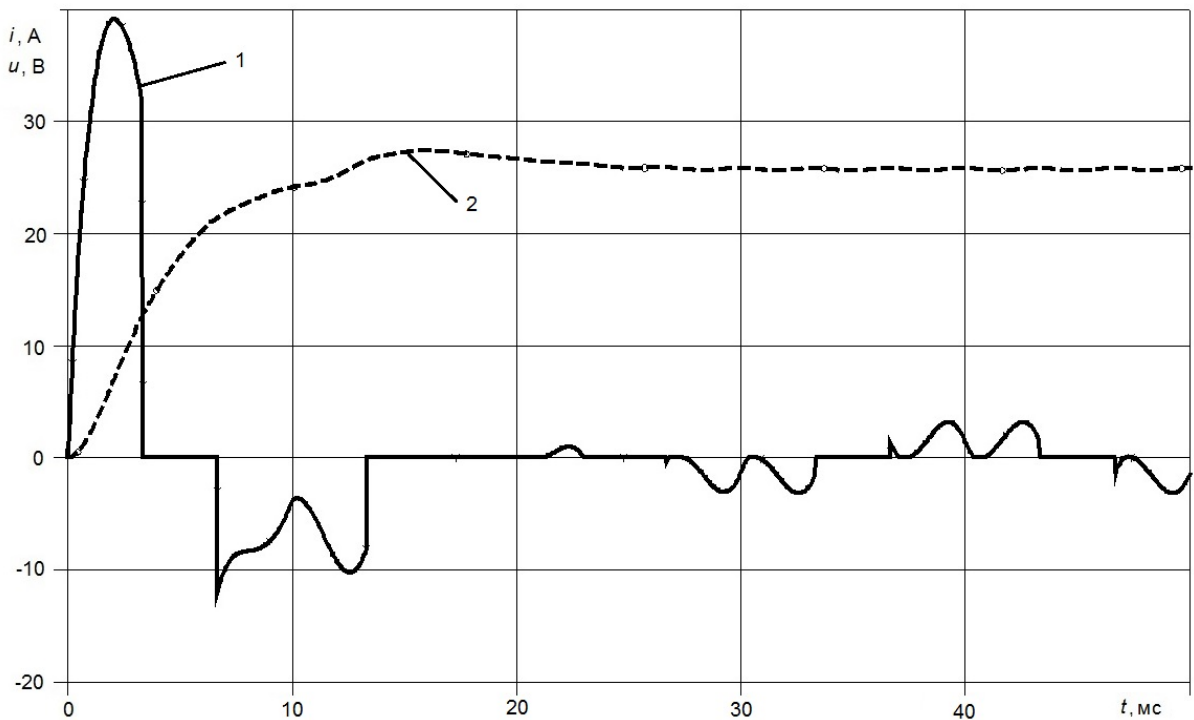


Рисунок 4 – Результаты моделирования при наличии L_d . Начальный участок процесса включения ПЧ, изображенного на рис. 2

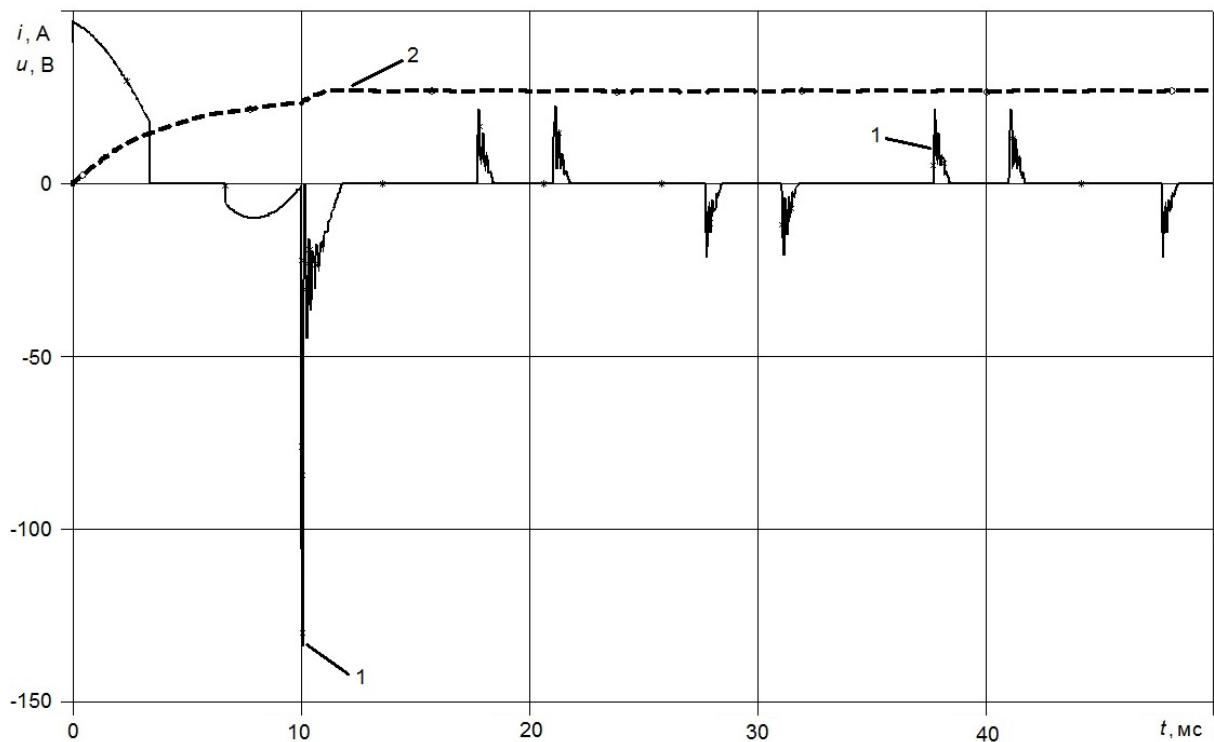


Рисунок 5 – Результаты моделирования при отсутствии L_d . Начальный участок процесса включения ПЧ

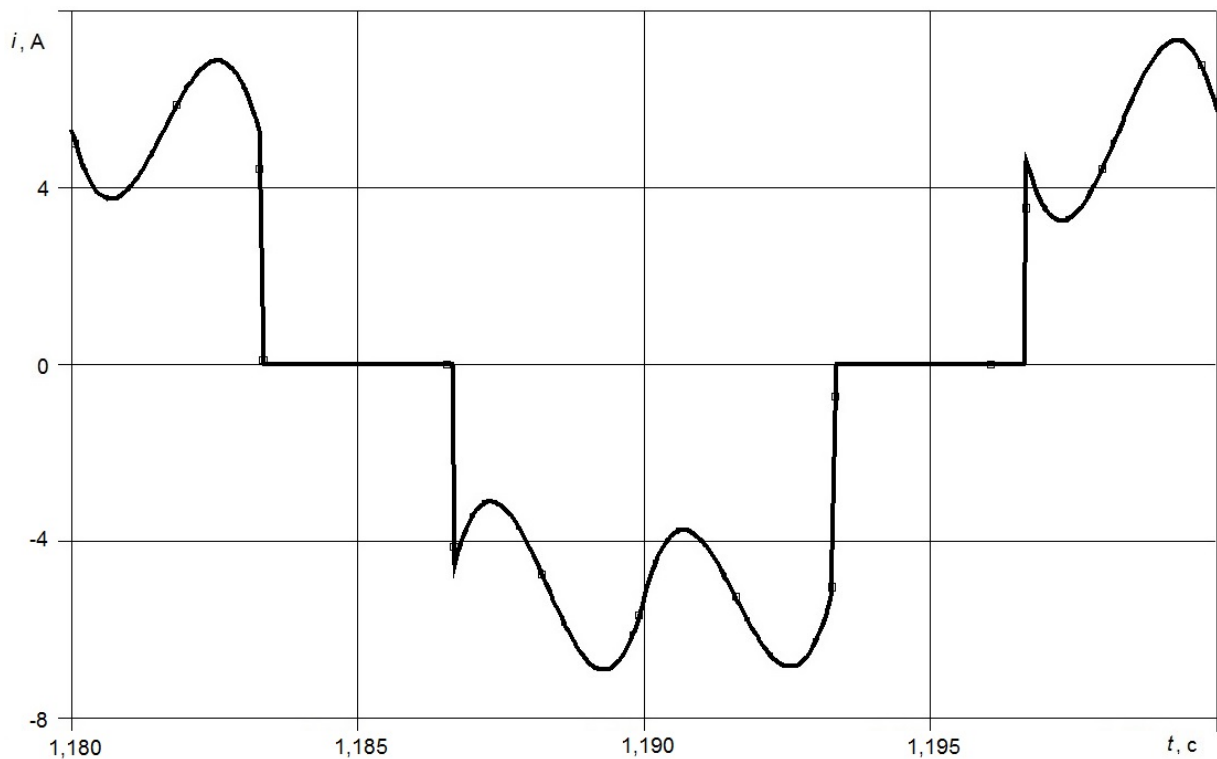


Рисунок 6 – Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ из сети в установившемся режиме по окончании разгона АД при наличии L_d

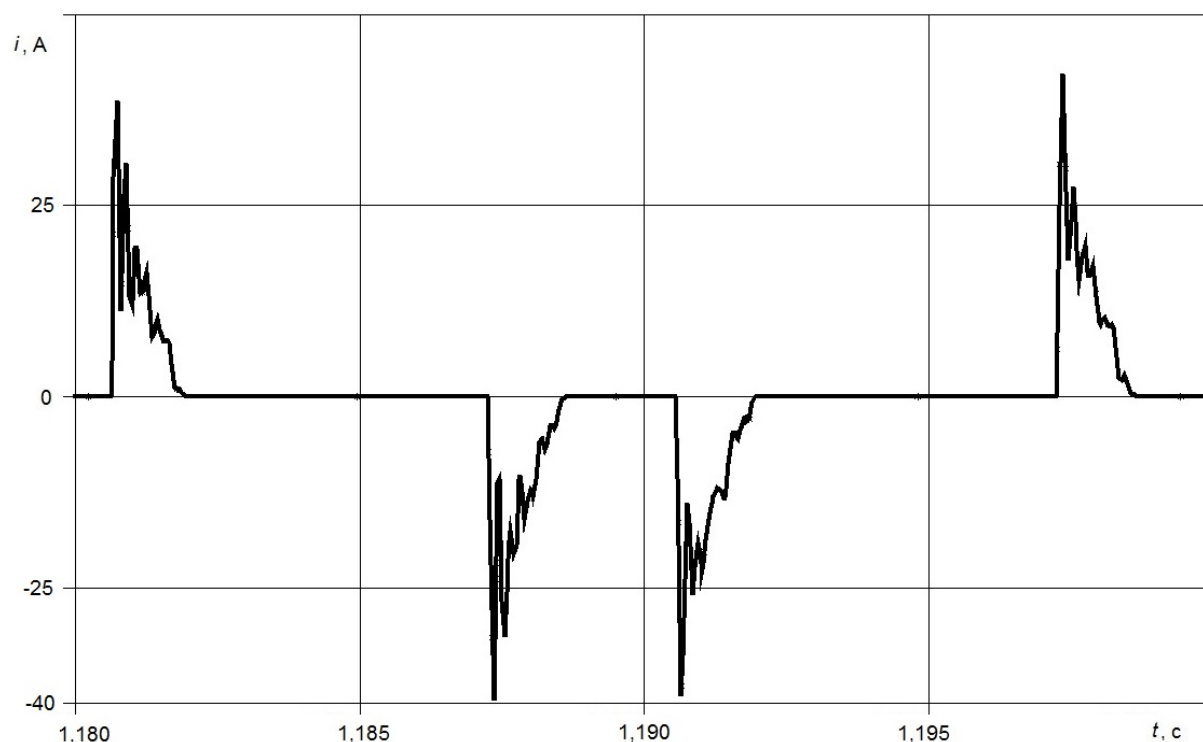


Рисунок 7 – Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ из сети в установившемся режиме по окончании разгона АД при отсутствии L_d

Таблица 4 - Характеристики и параметры ПЧ, принятые при моделировании

Наименование и размерность характеристики или параметра	Значение		
Номинальная мощность подключенного АД, кВт	0,37	0,75	7,5
Емкость Г-образного фильтра, мкФ	120	250	2400
Индуктивность Г-образного фильтра, мГн	18	18	2,2
Зарядное сопротивление, Ом	20	15	3
Задержка начала замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление, от момента времени подачи напряжения на ПЧ, с	0,005	0,01	0,01

Таблица 5 - Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ при разных мощностях АД

Наименование и размерность характеристики	Значение		
Номинальная мощность подключенного АД, кВт	0,37	0,75	7,5
Мгновенное максимальное напряжение на C_d в процессе заряда, В	575,462	542,402	644,729
Мгновенный максимальный ток при заряде C_d через зарядное сопротивление, А	18,401	25,001	147,618
Мгновенный максимальный ток при дозаряде C_d через контакт, шунтирующий зарядное сопротивление, А	-7,967	-5,817	-145,116
Мгновенный максимальный ток в процессе частотного разгона АД, А	-6,580	8,645	-42,426
Амплитуда тока в установившемся режиме по окончании разгона АД, А	4,342	-8,649	31,912

Максимумы тока, потребляемого фазой ПЧ различной мощности, и время достижения максимумов приведены в табл. 6 с целью оценки их одновременности. Отметим, что величина максимума потребляемого тока слабо зависит от фазы напряжения в момент включения ПЧ. Времена максимумов тока во всех случаях столь близки, что можно рассмотреть худший случай, приняв наступление максимумов потребления тока фазы из сети разными ПЧ одновременно.

Таблица 6 - Максимумы тока, потребляемого фазой ПЧ

Номинальная мощность подключенного АД, кВт	Мгновенный максимальный ток при заряде C_d через зарядное сопротивление	Время достижения максимума, мс	Мгновенное значение тока в момент времени 2,07 мс
7,5	147,618	2,035	147,580
1,5	39,131	2,070	39,131
0,75	25,001	2,200	24,885
0,37	18,103	1,675	17,560

Пусть, например, одновременно включаются ПЧ, к которым подключены: АД на 1,5 кВт – 1 шт., АД на 0,75 кВт – 6 шт. и АД на 0,37 кВт – 9 шт. Суммарная установленная мощность питаемых АД в данном случае составит 9,33 кВт. Нетрудно подсчитать, что суммарный максимум тока, потребляемого фазой преобразователей при их одновременном включении, составит 352 А, что превышает номинальный ток ИБП в 8,8 раз. Известно, что непосредственно перед выходом из строя ИБП фиксировались пики потребляемого от него тока до 10 крат к номинальному. При одновременном включении 25 шт. ПЧ, к каждому из которых подключен АД на 0,37 кВт, суммарная установленная мощность АД составит 9,25 кВт, а суммарный максимум тока 625 А, что превышает номинальный ток ИБП уже в 15,6 раз. С другой стороны, если мы будем одновременно включать ПЧ, к которым подключены: АД на 7,5 кВт – 1 шт., АД на 1,5 кВт – 1 шт., АД на 0,37 кВт – 1 шт. (суммарная установленная мощность АД 9,37 кВт), то суммарный максимум тока будет 205 А, что превышает номинальный ток ИБП только в 5,1 раз.

Выводы. Как показали результаты математического моделирования, максимальное мгновенное значение тока фазы, потребляемое ПЧ, наблюдается в процессе заряда C_d . Наличие индуктивности L_d следует признать весьма полезным и желательным, поскольку она оказывает сильное ограничивающее действие на пиковые и амплитудные значения тока, потребляемого ПЧ, а также благоприятно влияет на гармонический состав потребляемого тока, улучшая электромагнитную совместимость ПЧ. В процессе включения группы ПЧ под напряжение потребляемые фазами токи могут достигать опасных для силовых ключей ИБП значений, кратно превышающих заявленную перегрузочную способность, хотя и более кратковременных. Требуется принятие мер для обеспечения разновременности максимумов токов, потребляемых отдельными ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pustovetov M. Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes / M. Yu. Pustovetov // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2016). Date of Conference: 15-17 Nov. 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819069.

2. Пустоветов М.Ю. Подход к реализации на ЭВМ математической модели асинхронного двигателя, предназначенной для использования в качестве составной части моделей электротехнических комплексов и систем / М.Ю. Пустоветов // Моделирование. Теория, методы и средства: материалы 16-ой Междунар. науч.-практ. конф., посв. 110-летию Южно-Рос. гос. политехнич. ун-та (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, 6-7 дек. 2016 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2016. – С. 332 – 344.



3. Пустоветов М.Ю. Моделирование характеристик частотно-регулируемого электропривода с синус-фильтром / М.Ю. Пустоветов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2013. – №1. – С. 18-26.

4. Преобразователи частоты транзисторные мощностью от 5,5 до 315 кВт. Руководство по эксплуатации РДЦБ.435321.001 РЭ версия 5.5 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://etx-in.ru/files/ETX-IN-FCseries04-5.5-315kW-user-manual_v5.5_web.pdf

5. Преобразователи частоты Altivar 71 для трехфазных асинхронных двигателей мощностью от 0,37 до 500 кВт. Каталог 07 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.is-com.ru/files/katalog_atv71.pdf

УДК 621.311

ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СЕТИ

М.Н. Савельева¹, С.А. Зубков²

¹кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-технического центра «Информационные технологии», Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com

²директор научно-технического центра «Информационные технологии», Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, e-mail: szubkov@sfedu.ru

Аннотация. В работе рассматриваются интеллектуальные энергосети (Smart Grid). Описаны основные ее компоненты, достоинства и проблемы, возникающие в результате проектирования и реализации подобного рода сетей.

Ключевые слова: Smart Grid, умные сети, энергетика, энергетические сети.

IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN ENERGY NETWORKS

Marina Savelyeva¹, Sergey Zubkov²

¹Ph.D. of technical Sciences, Senior research fellow of Scientific technical center “Information Technologies”, Southern Federal University, Taganrog, Russia, e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com

²Director of Scientific technical center “Information Technologies”, Southern Federal University, Taganrog, Russia, e-mail: szubkov@sfedu.ru

Abstract. The work considers Smart Grid. Its main components, advantages and problems arising because of designing and rotating and realizing such networks are described.

Keywords: Smart Grid, power industry, energy, energy network.

Введение. Развитие промышленности и возобновляемых источников энергии, рост городов значительно повысили требования к энергетической

