

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Нижний Новгород 2021

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. № 1 (13). – 112 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ХРОНИКИ	4
Георгий Борисович Онищенко. К 90-летию со дня рождения.....	4
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	7
Авербух М.А., Кузнецова А.Д. Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем.....	7
Крысанов В.Н., Хайченко И.А., Бабенко В.В., Нефедов Ю.В. Алгоритм управления статических преобразователей в производствах со смешанной нагрузкой для повышения уровня электромагнитной совместимости электрооборудования.....	19
Кузнецов А.В., Ребровская Д.А., Чикин В.В. Модель дифференцированного тарифа для управления режимом потребления реактивной мощности.....	31
Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Исакичев В.В. Уточнение параметров магнитного поля в области зубцовой зоны индукторной машины.....	53
Юртаев С.Н., Кофорова Т.О. Эффективность капитальных вложений энергоснабжающих организаций	64
Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Требования безопасности для железнодорожных линий электропередачи напряжением до 35 кВ	74
Туманов И.Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости.....	83
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	93
Тихомиров В.А., Бычков Е.В. Компьютерный анализ КПД преобразовательных устройств.....	93

ХРОНИКИ

ГЕОРГИЙ БОРИСОВИЧ ОНИЩЕНКО К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ



4 апреля 2021 г. исполняется 90 лет Георгию Борисовичу Онищенко, научному руководителю компании «Приводная техника» (ОЭЗ «Технополис Москва»).

Георгий Борисович Онищенко – известный ученый, доктор технических наук, почетный академик АЭН РФ, заслуженный деятель науки РФ, главный редактор журналов «Приводная техника» и «Новые технологии». Четверть века он возглавляет научные исследования в головном институте электротехнической промышленности – ВНИИ

«Электропривод». Неполный перечень созданных им автоматизированных электроприводов для важнейших промышленных объектов страны включает третий блок Белоярской атомной станции на быстрых нейтронах, систему обслуживания ракеты на старте космодрома «Байконур», первую отечественную скоростную бумагоделательную машину БМ-600 Кондапожского ЦБК со скоростью выработки бумажного полотна 600 м/мин, крупнейший в мире шахтный вентилятор главного проветривания Норильского ГОК мощностью 5000 кВт, карьерные экскаваторы с ковшом емкостью 20 м³ для Якутского угольного бассейна, плавучие буровые установки ПБУ 6000/60, отечественные скоростные лифты для высотных зданий и др.

Тридцать лет жизни Георгия Борисовича Онищенко посвящены работе в Московском государственном открытом университете, где все эти годы он бесценно возглавлял кафедру «Электропривод и автоматизация промышленных установок». За это время кафедра подготовила для электротехнической промышленности страны свыше тысячи инженеров-электриков. Под руководством профессора Г.Б. Онищенко около двадцати его учеников стали кандидатами и докторами технических наук.

Георгий Борисович Онищенко является автором более двухсот опубликованных научных трудов и двадцати изобретений. Им написаны шесть учебников для студентов средних и высших учебных заведений; совсем недавно вышла в свет его новая книга «Электрические двигатели». Несмотря на большую занятость, профессор Г.Б. Онищенко всегда находил время и силы для разнообразной общественной работы: в Комитете по Ленинским и Государственным премиям СССР, в Советско-Финском Совете по экономическому сотрудничеству, в Ассоциации инженеров по электроприводу, в Международных конференциях по автоматизированному электроприводу. Он является руководителем программы по созданию электрооборудования для нужд станкостроения, членом многих советов по защите диссертаций по направлению «Электротехнические комплексы и системы», членом Научного Совета Госкомитета по науке и технике СССР по проблеме «Машины и материалы», членом Научно-технического Совета Минэлектротехпрома, научным руководителем проблемы создания унифицированных низковольтных комплектных устройств.

В качестве научного руководителя он активно работает в компании НТЦ «Приводная Техника», делясь своим многолетним бесценным опытом со специалистами всех уровней и генерируя новые идеи и проекты!

Авторский курс видеолекций профессора Г.Б. Онищенко по тематике «Автоматизированный электропривод», созданный совсем недавно, используется уже в учебных программах многих вузов страны. Насколько

современен и востребован этот видеокурс, можно судить по количеству его просмотров в Youtube – это сотни тысяч, и цифры эти растут!

Многие годы Георгий Борисович связан с Нижегородским государственным техническим университетом (Горьковским политехническим институтом). Он много сделал для подготовки кадров высшей квалификации, являясь официальным оппонентом по защитам целого ряда кандидатских и докторских диссертаций. Профессор Г.Б. Онищенко является наиболее активным членом диссертационного совета Д 212.165.02 по специальностям «Электротехнические комплексы и системы» и «Силовая электроника».

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_07

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРАНОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

М.А. Авербух

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
avers45@rambler.ru

А.Д. Кузнецова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
kuznetsova.alvina@yandex.ru

Представлено имитационное моделирование частотного кранового электропривода с заменой неуправляемого выпрямителя (НВ) на входе преобразователя частоты на управляемый активный выпрямитель (АВ) в системе «Полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» (ППЧ-АД) в среде *Matlab/Simulink*. Электроснабжение основных механизмов осуществляется от понижающего трансформатора, который, в свою очередь, является согласующим трансформатором для частотных электроприводов механизмов подъема, передвижения тележки и передвижения крана. Имитационная модель построена в соответствии с реальной схемой электроснабжения и электропривода подъема мостового крана. Управление автономным инвертором напряжения ППЧ построено по векторному принципу со стабилизацией потокосцепления ротора. Результаты имитационного моделирования подтвердили возможность использования АВ взамен НВ в системе ППЧ-АД. При этом динамические процессы в электроприводе при подъеме груза удовлетворяют техническим требованиям к крановым электроприводам. С помощью имитационного моделирования произведена оценка коэффициента мощности на входе АВ. Результаты моделирования подтверждают его повышение в сравнении со схемой с НВ.

Ключевые слова: активный выпрямитель, имитационное моделирование, коэффициент мощности, кран, частотный электропривод, электропривод, электропривод подъема.

Для цитирования: Авербух М.А., Кузнецова А.Д. Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 7-18. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_07.

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN CRANE ELECTRIC DRIVE WITH ACTIVE RECTIFIER

M.A. Averbukh

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov
Belgorod, Russia
avers45@rambler.ru

A.D. Kuznetsova

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov
Belgorod, Russia
kuznetsova.alvina@yandex.ru

Abstract. The features of simulation for variable frequency crane drive with the replacement of an uncontrolled rectifier at the input of the frequency converter with a controlled active front-end (AFE) in the semiconductor frequency converter-asynchronous squirrel cage motor system (SFC-AM) in Matlab/Simulink are presented in this paper. The main mechanisms are powered by the step-down transformer, which one, for its part, is a matching transformer for variable frequency drives of lifting mechanisms, trolley and crane movement. The simulation model is built in accordance with the real scheme of power supply and electric drive for lifting an overhead crane. The SFC autonomous voltage inverter regulation is built on the vector control principle with the rotor flux linkage stabilization. The vector control method is also applied for the AFE control. The simulation modelling results confirmed the possibility of using AFE instead of the uncontrolled rectifier in the SFC-AM system. At the same time, the dynamic processes in the electric drive of lifting mechanisms meet the technical requirements for the electric crane drives. By the simulation, the power factor was estimated at the AFE input and the results confirm its increase in comparison with the circuit with the uncontrolled rectifier.

Keywords: active front-end, crane, electric drive, electric drive for lifting, power factor, simulation, variable frequency drive.

For citation: M.A. Averbukh and A.D. Kuznetsova, “Simulation of dynamic processes in crane electric drive with active rectifier”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 7-18, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_07.

1. Введение

В настоящее время все большее распространение получает крановый электропривод на базе полупроводникового преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД). Применение таких электроприводов в сравнении с электроприводами постоянного тока имеет ряд преимуществ:

- отсутствие щеточно-коллекторного узла;
- отсутствие требований дополнительного узла возбуждения;
- высокая надежность и простота конструкции;
- меньшие габариты и момент инерции при одинаковых мощностях двигателей [1-4].

Вместе с тем, следует отметить существенные недостатки применения неуправляемых выпрямителей (НВ) на входе (ППЧ) [5-7]:

- генерация высших гармоник тока и напряжения в питающую сеть;
- ухудшение коэффициента мощности сети со стороны переменного тока;
- отсутствие возможности осуществлять рекуперацию энергии без дополнительных блоков.

Перечисленные недостатки отсутствуют в системе частотного электропривода, если на входе ППЧ устанавливается активный выпрямитель (АВ), построенный аналогично автономному инвертору напряжения (АИН) с преобразованием трехфазного входного напряжения в постоянное управляемое выходное напряжение [8]. Замена НВ на АВ позволяет повысить КПД всей системы электропривода за счет возможности рекуперации энергии в питающую сеть и снижения потребления реактивной мощности.

Целью работы является оценка возможности использования АВ в частотном электроприводе с учетом режимов работы кранового электропривода подъема путем имитационного моделирования в *Matlab/Simulink*.

II. Характеристика кранового электропривода подъема

Основной особенностью мостовых кранов является одновременность работы электроприводов подъема крана, перемещения крана и перемещения тележки. Выполнение необходимых диаграмм движения осуществляется за счет частотного электропривода. Преобладание цикличности работы крановых электроприводов со значительным периодом длительности переходных процессов способствует генерированию в питающую сеть высших гармонических составляющих токов и напряжений.

В табл. 1 представлены основные параметры и технические характеристики электрического мостового крана общего назначения грузоподъемностью 16 т с режимом работы А5 и кабиной закрытого типа.

Таблица 1.
 Параметры и технические характеристики мостового крана

Table 1.
 Parameters and technical characteristics of the overhead crane

№ п/п	Наименование параметра, единицы измерения	Значения параметров
1	Грузоподъемность, т	16
2	Пролет крана L_k , м	16,5
3	Диапазон подъема $H_{гд}$, м	20
4	Режим работы крана	A5
5	Управление краном	от пола
6	Скорость подъема крана/ревизии, м/с	0,067/0,017
7	Скорость передвижения крана, м/с	0,88
8	Скорость передвижения тележки, м/с	0,5

На рис. 1 представлена схема электроснабжения крановых механизмов.

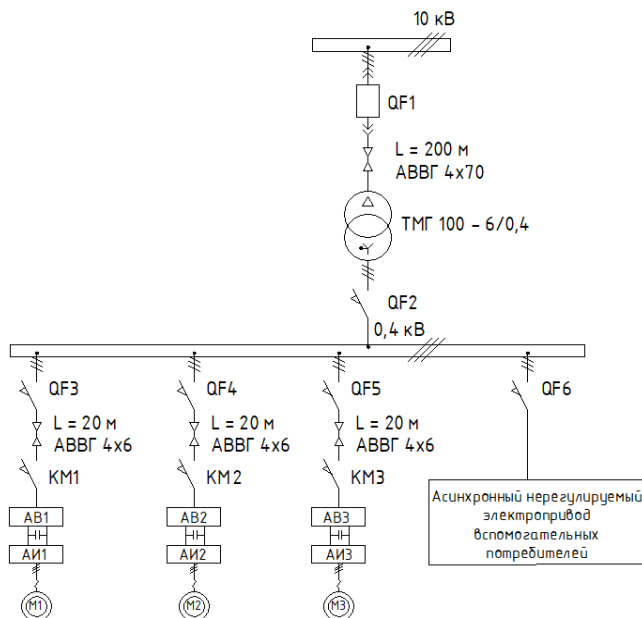


Рис. 1. Схема электроснабжения крановых механизмов

Fig. 1. Power supply diagram of crane mechanisms

Обозначения на рис. 1: $QF1$ – вакуумный выключатель на стороне 10 кВ; $QF2$ – вводной автоматический выключатель на стороне 0,4 кВ; $QF3$ - $QF6$ – автоматические выключатели потребителей; $KM1$ - $KM3$ – контакторы; $AB1$ - $AB3$ и $AI1$ - $AI3$ – активные выпрямители на входе и автономные инверторы напряжения в составе каждого из трех ППЧ соответственно; $M1$ - $M3$ – электроприводы подъема, передвижения крана и передвижения тележки соответственно.

Как следует из рис. 1, питание крановых электроприводов осуществляется через понижающий трансформатор, который одновременно является и согласующим. В табл. 2 представлены паспортные данные крановых электродвигателей и понижающего трансформатора. Для электродвигателя подъема приводятся параметры обмоток статора и ротора в именованных единицах.

Таблица 2.
Технические параметры крановых электродвигателей и понижающего трансформатора

Table 2.
Technical parameters of crane electric motors and step-down transformer

№ п/п	Тип двигателя	Паспортные данные					
		U_n , В	P_n , кВт	f_n , Гц	КПД _n , %	$\cos\phi_n$, о.е.	n_n , об/мин
1.	Двигатель передвижения крана 7FMTK132M6	360* (380)	7,2	47* (50)	85,1	0,83	901
2.	Двигатель передвижения тележки 7FMTK132S6	360* (380)	5,35	47* (50)	83,5	0,84	897
3.	Двигатель подъема 7FMTK200M6	360* (380)	22	47* (50)	89,6	0,87	914
		Параметры обмоток статора и ротора в именованных единицах					
		$R1$, Ом	$R2'$, Ом	$X1$, Ом	$X2'$, Ом	X_M , Ом	
		0,207	0,124	0,398	0,861	16,36	
	Тип трансформатора	$S_{нтр}$, кВА		$U_{1нтр}$		$U_{2нтр}$	
4.	Понижающий трансформатор ТМГ-100-10(6)/0,4	100		$(6,10) \pm 2 \cdot 2,5\%$		0,4	

*Номинальное напряжение двигателя 360 В при номинальной частоте 47 Гц соответствует номинальному магнитному потоку двигателя

III. Построение имитационной модели системы электроснабжения и кранового электропривода подъема с АВ

Имитационная модель для исследования динамических процессов (рис. 2) строится в пакете *Matlab/Simulink* на основании реальной системы кранового электропривода с учетом его схемы электроснабжения (рис. 1) [9-13]. Модель включает трехфазный источник синусоидального напряжения, трехфазные выключатели переменного тока, понижающий трехфазный двухобмоточный трансформатор, преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока с АИН и на входе с АВ, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для измерения параметров динамических процессов, протекающих в элементах электропривода и питающей сети, используются измерительные блоки.

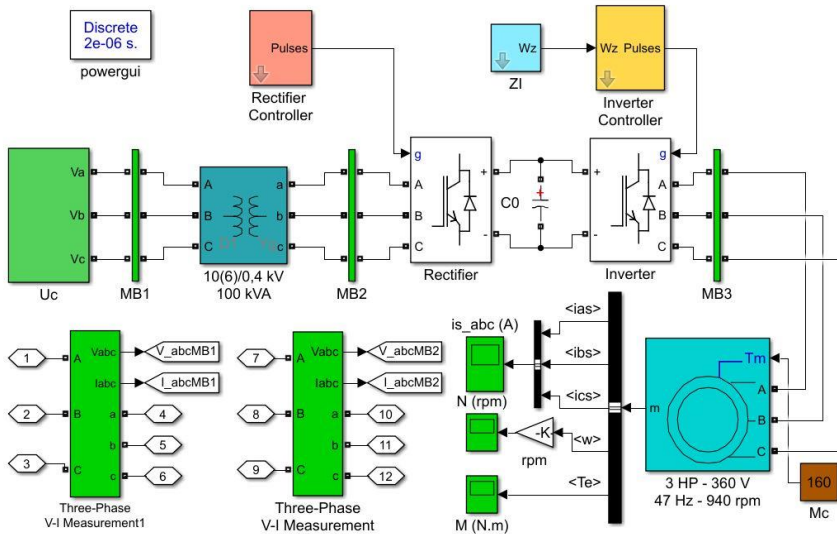


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения и электропривода подъема с АВ в *Matlab/Simulink*

Fig. 2. Simulation model of the power supply system and electric drive for lifting with a controlled active front-end in the *Matlab/Simulink*

Параметры трансформатора и электродвигателя задаются в окнах ввода параметров (рис. 3) соответствующих блоков. Система управления АВ строится по принципу векторного управления с преобразованием коор-

динат как двухконтурная система подчиненного регулирования с раздельным управлением по проекциям обобщенного вектора сетевого тока и контуром стабилизации напряжения силового фильтра в звене постоянного тока. Структурная схема управления АВ представлена на рис. 4, а. Система управления АИН электроприводом подъема реализует векторное управление и построена по принципу подчиненного регулирования с формированием каналов по составляющим потокосцепления статора и момента. Для всех контуров регулирования приняты ПИ-регуляторы с настройкой на модульный оптимум, ПИ-регулятор скорости настроен на симметричный оптимум (рис. 4, б).

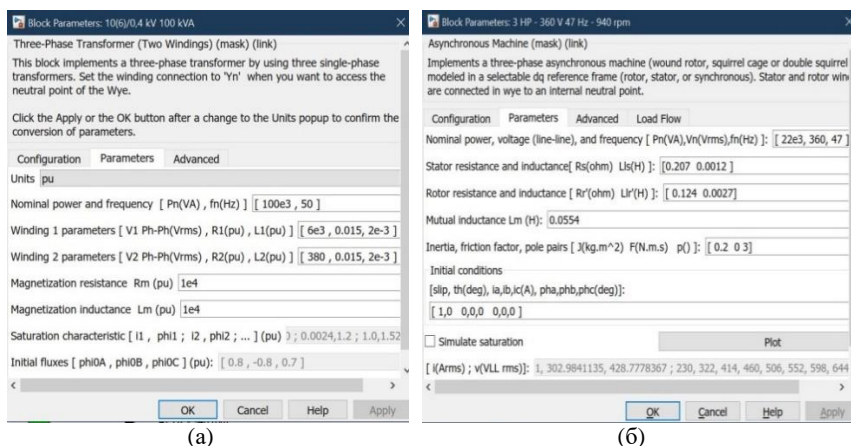


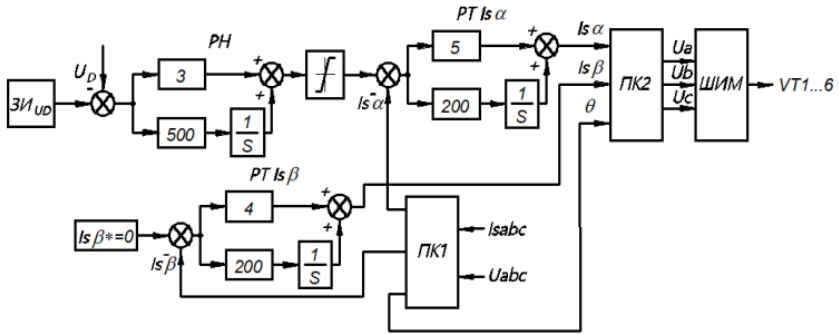
Рис. 3. Окна ввода параметров блоков:
трансформатора (а); двигателя «Asynchronous Machine» (б)

Fig. 3. Block parameters input windows:
transformer (a); engine «Asynchronous Machine» (b)

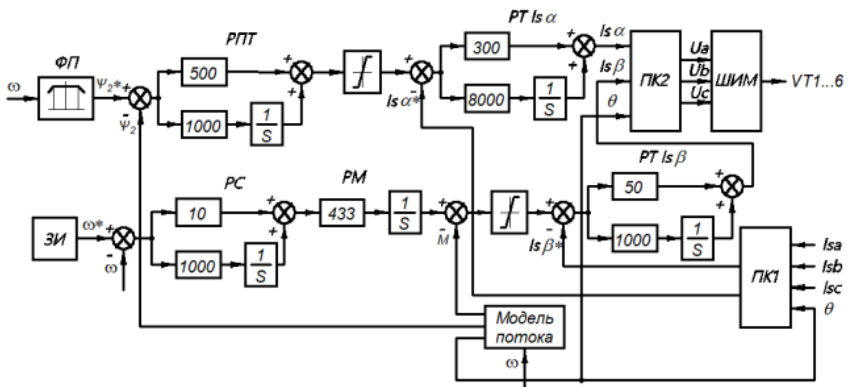
В структурной схеме систем управления АВ и АИН (рис. 4) используются следующие элементы: ZI_{UD} – датчик напряжения звена постоянного тока; PH – регулятор напряжения; $PT I_s\alpha$, $PT I_s\beta$ – регуляторы тока во вращающейся системе координат α - β (для обеих схем); $PK1$, $PK2$ – прямой и обратный преобразователи координат (для обеих схем); ШИМ – широтно-импульсный модулятор (для обеих схем); ФП – формирователь потока; ZI – датчик интенсивности; РПТ, РС, РМ – регуляторы потока, скорости и момента.

IV. Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения и электропривода подъема с АВ

На рис. 5 представлены результаты моделирования процесса разгона двигателя до установившейся скорости. С этой целью через задатчик интенсивности задается необходимая скорость вращения. При этом время пуска двигателя составляет 0,6 с. Двигатель нагружен постоянным моментом статических сопротивлений $M_c = 0,7 \cdot M_n = 160 \text{ Н}\cdot\text{м}$.



(a)



(б)

Рис. 4. Структурные схемы систем управления: активным выпрямителем (а); автономным инвертором напряжения (б)

Fig. 4. Block diagrams of control systems: active rectifier (a); autonomous voltage inverter (b)

Как следует из рис. 5, напряжение в промежуточном звене постоянного тока составляет $U_{DC} = 520$ В, что несколько выше, чем напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя; время переходного процесса в электродвигателе составляет $t_{\text{пн}} = 0,63$ с; ток статора в процессе пуска не превышает трехкратного значения установившегося тока, который поддерживается на уровне $I_s = 80$ А; перерегулирование по скорости в момент пуска составляет $\sigma = 11$ %, что соответствует настройке регулятора скорости на симметричный оптимум; установившаяся скорость вращения достигает отметки $n = 912$ об/мин, что почти соответствует номинальной скорости АД, отклонение при этом составляет $\delta = 0,002$ %; колебание момента при пуске не превышает максимально допустимого момента и составляет $M = 230$ Н·м; значение момента на валу двигателя $M = 160$ Н·м соответствует заданному моменту нагрузки $M_c = 160$ Н·м.

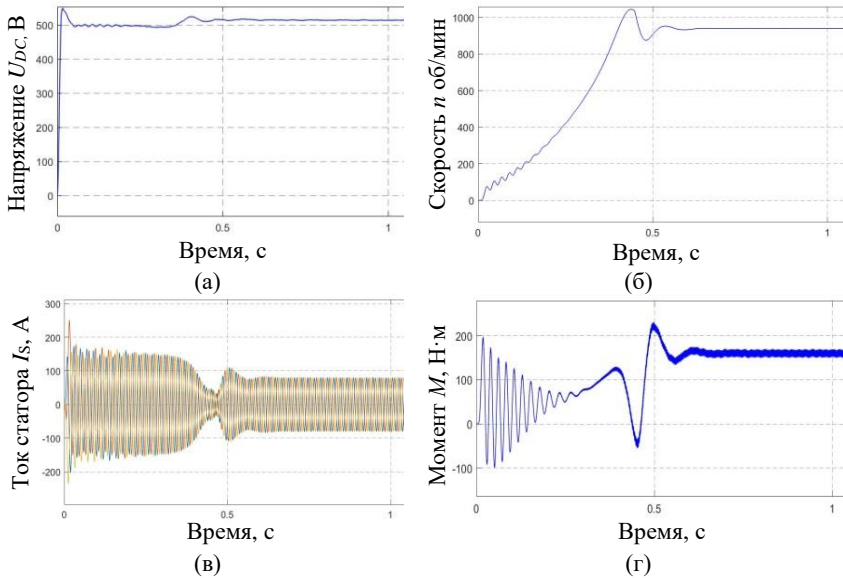


Рис. 5. Динамические характеристики электропривода: напряжение в звене постоянного тока U_{DC} , В (а); ток статора I_s , А (б); скорость n , об/мин (в); момент M двигателя, Н·м (г)

Fig. 5. Dynamic characteristics of the drive: DC link voltage U_{DC} , V (a); stator current I_s , A (b); speed n , rpm (в); torque M of the engine, N·m (g)

На рис. 6 показаны напряжения и токи на входе АВ. Для наглядности результатов представлен диапазон значений от 0,1 до 0,145 с. Угол сдвига фаз между измеренными значениями напряжения и тока на входе АВ практически равен нулю, что говорит о том, что коэффициент мощности со стороны питающей сети примерно равен единице.

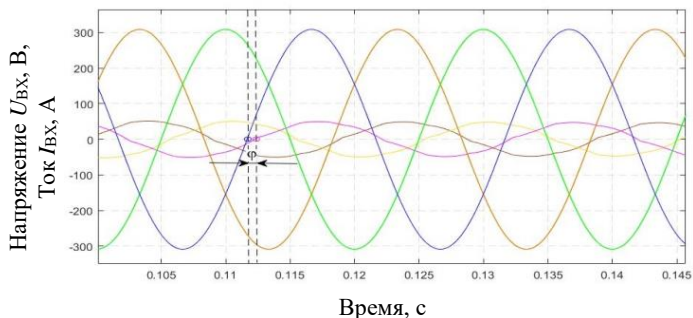


Рис. 6. Кривые напряжения и тока на входе АВ

Fig. 6. Voltage and current curves at the active front-end input

IV. Заключение

Результаты имитационного моделирования режимов кранового частотного электропривода подъема с заменой на входе НВ на АВ показали эффективность использования АВ. Это подтверждается следующими фактами:

- поддержание значения напряжения в звене постоянного тока большим, чем на выходе НВ, без дополнительных устройств, что повышает энергоэффективность кранового электропривода подъема;
- возможность получения значения коэффициента мощности со стороны питающей сети $\cos\varphi \approx 1$, что означает снижение потребления реактивной мощности и уменьшение потерь электроэнергии в сети.

© Авербух М.А., 2021

© Кузнецова А.Д., 2021

Поступила в редакцию 25.02.2021

Received 25.02.2021

Библиографический список

- [1] Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- [2] Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

- [3] Авербух М.А., Лимаров Д.С. Обеспечение электромагнитной совместимости крановых частотных электроприводов с электрическими сетями промышленных предприятий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 185с.
- [4] Попков О.З. Основы преобразовательной техники. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.
- [5] Авербух М.А., Коржов Д.Н., Лимаров Д.С. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ-465 // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 48-53.
- [6] Chen H., Xuan B., Yang P., Chen H. A new overhead crane emergency braking method with theoretical analysis and experimental verification // *Nonlinear Dynamics*. 2019. вып. 98 (3). С. 2211-2225. DOI: 10.1007/s11071-019-05318-6.
- [7] Kessal A. Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC: дис. докт. техн. наук, Universite Ferhat Abbes-Setif, Сетиф, Алжир, 2012. – 134 с (на французском).
- [8] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [9] Нго С.К., До Н.И., Зьонг Х.А. Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 221-228.
- [10] Авербух М.А., Жуков Н.А., Прокопишин Д.И. Разработка аппаратной части активного фильтрокомпенсирующего устройства // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1. С. 105-113. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_105.
- [11] Patel V., KGiri V. Field oriented control of PMSM drive using SVPWM. // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. 2014. Т. 2. Вып. 3. С. 246-255.
- [12] Awdaa M.A., Obed A.A., Saleh A.L. Three-phase induction motor SVPWM-FOC control based on PLC Matlab translation approach // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 745. № 012028. С. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- [13] Merai M., Naouar M.W., Slama-Belkhouja I., Monmasson E. An improved dc-link voltage control for a three-phase PWM rectifier using an adaptive PI controller combined with load current estimation // 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Сентябрь 11-14, 2017, Варшава, Польша. С. 1-10. DOI: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099219.

References

- [1] B.I. Firago and L.B. Pavlyachik, *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka [Variable AC Drives]*. Minsk: Techno Perspective, 2006 (in Russian).
- [2] V.I. Klyuchev, *Teoriya elektroprivoda [Electric drive theory]*. Moscow: Energoatomizdat, 2001 (in Russian).
- [3] M.A. Averbukh and D.S. Limarov, *Obespechenie elektromagnitnoj sovmestimosti kranovykh chastotnykh elektroprivodov s elektricheskimi setyami promyshlennykh predpriyatij [Electromagnetic compatibility support for variable frequency crane drives with industrial enterprises electric grids]*. Belgorod: BSTU, 2016 (in Russian).
- [4] O.Z. Popkov “*Osnovy preobrazovatel'noj tekhniki [Fundamentals of converter equipment]*”. Moscow: MPEI, 2010. (in Russian).

- [5] M.A. Averbukh, D.N. Korzhov and D.S. Limarov, "Experimental evaluation of the level of higher harmonics in the power supply circuit of the pipe bending mill UZTM-465", *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 48-53, 2015.
- [6] H. Chen, B. Xuan, P. Yang and H. Chen, "A new overhead crane emergency braking method with theoretical analysis and experimental verification", *Nonlinear Dynamics*, vol. 4, no. 3, pp. 2211-2225, Nov. 2019. DOI: 10.1007/s11071-019-05318-6.
- [7] A. Kessal, *Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC [Correction of the power factor at the input of an AC/DC converter]*, Doctorat en Sciences thesis, Université Ferhat Abbes-Setif, Setif, Algeria, 2012 (in French).
- [8] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academy, 2006.
- [9] X.C. Ngo, N.Y. Do and H.A. Duong, "Modeling of the electric drive with frequency control of the asynchronous machine", *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 3, pp. 221-228, 2014.
- [10] M.A. Averbukh, N.A. Zhukov and D.I. Prokopishin "Development hardware part of active harmonic filter", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 105-113, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_105.
- [11] V. Patel and V. KGiri, "Field oriented control of PMSM drive using SVPWM", *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 246-255, 2014.
- [12] M.A. Awdaa, A.A. Obed and A.L. Saleh, "Three-phase induction motor SVPWM-FOC control based on PLC Matlab translation approach", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 745, no. 012028, pp. 1-8, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- [13] M. Merai, M.W. Naouar, I. Slama-Belkhdja and E. Monmasson, "An improved dc-link voltage control for a three-phase PWM rectifier using an adaptive PI controller combined with load current estimation", in proc. *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Sept. 11-14, 2017, Warsaw, Poland, pp. 1-10. DOI: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099219.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Авербух Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Кузнецова Альвина Дмитриевна, аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Mikhail A. Averbukh, D. Sci. (Eng.), professor of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov, Belgorod, Russian Federation.

Alvina D. Kuznetsova, graduate student of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov, Belgorod, Russian Federation

УДК 621.316.761, 62-533.6

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_19

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВАХ СО СМЕШАННОЙ НАГРУЗКОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В.Н. Крысанов

ООО ПКФ «Современные Технологии»

Воронеж, Россия
sovteh2000@mail.ru**И.А. Хайченко**

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия
li740@yandex.ru**В.В. Бабенко**

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия
vova.babenko.94@mail.ru**Ю.В. Нефедов**

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия
dharma_lost@bk.ru

Исследуются вопросы реализации нормируемого государственными стандартами уровня электромагнитной совместимости статических преобразователей в сетях со смешанной нагрузкой. Рассмотрены современные производства, в рамках технологического процесса которых необходима дополнительная корректировка режима работы статических преобразователей, использующих принципы импульсно-фазового и частотно-импульсного управления. Определена критериальная оценка оптимального режима работы преобразователей с учетом таких факторов качества электроснабжения потребителей, как уровень генерации высших гармонических и колебаний напряжения. Предложен алгоритм работы системы управления статическими преобразователями типа «тиристорные регуляторы мощности», который обеспечивает основные показатели качества электроснабжения и электромагнитной совместимости во всем диапазоне регулирования выходной мощности. Разработана блок-схема системы управления тиристорными ключами тиристорных регуляторов мощности. Методологически определены основные факторы, влияющие на вели-

чину уставки перехода от режима частотно-импульсного управления к режиму импульсно-фазового управления статических регуляторов мощности. Проведено имитационное моделирование в программной среде *MatLab Simulink* на примере промышленной установки производства полимерно-композитных материалов. При моделировании изменялись параметры производственных установок (тип, мощности статических преобразователей и асинхронных двигателей), требования технологии (диапазоны регулирования и быстродействие) и системы электроснабжения (структура, установленные мощности и типы нагрузок). На основе анализа полученных результатов имитационного моделирования определено оптимальное значение сигнала на изменение режима работы тиристорных регуляторов мощности в соответствии с предложенными критериями.

Ключевые слова: алгоритм, качество электроэнергии, режимы управления статическими преобразователями, система управления, электромагнитная совместимость.

Для цитирования: Крысанов В.Н., Хайченко И.А., Бабенко В.В., Нефедов Ю.В. Алгоритм управления статических преобразователей в производствах со смешанной нагрузкой для повышения уровня электромагнитной совместимости электрооборудования // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 19-30. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_19

CONTROL ALGORITHM OF STATIC CONVERTERS IN MANUFACTURING WITH MIXED LOAD TO INCREASE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRICAL EQUIPMENT

V.N Krysanov

LLC PKF "Modern Technologies"
Voronezh, Russia
sovteh2000@mail.ru

I.A. Khaichenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
li740@yandex.ru

V.V. Babenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
vova.babenko.94@mail.ru

Y.V. Nefedov

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
dharna_lost@bk.ru

Abstract. The article discusses the implementation of the standardized level of electromagnetic compatibility of static converters in networks with mixed load. Modern production is considered, during the technological process of which additional adjustment of the operation mode of static converters using the principles of pulse-phase and frequency-pulse control is necessary. A criterion assessment of the optimal operation mode of the converters is determined taking into account factors of power quality such as the level of generation of higher harmonic and voltage fluctuations. Control algorithm for "thyristor power regulators" type static converters is proposed, which provides the main parameters of power quality and electromagnetic compatibility in the whole range of output power control. A block diagram of the thyristor key control system of the thyristor power regulators has been developed. The main factors affecting the setting value of the transition from the frequency-pulse control mode to the pulse-phase control mode of static power regulators are methodologically determined. Simulation modeling in MatLab Simulink on the example of the plant of production of polymeric and composite materials have been carried out. During the simulation, the parameters of production plants (type, capacities of static converters and asynchronous motors), technology requirements (control ranges and speed) and power supply systems (structure, installed capacities and types of loads) have been varied. Based on analysis of obtained results of simulation, optimal value of signal for change of operation mode of thyristor power regulators is determined in accordance with proposed criteria.

Keywords: algorithm, control system, power quality, electromagnetic compatibility, static converter control modes.

For citation: V.N Krysanov, I.A. Khaichenko, V.V. Babenko and Y.V. Nefedov. Control algorithm of static converters in manufacturing with mixed load to increase electromagnetic compatibility of electrical equipment // *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 19-30, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_19

I. Введение

Технология многих промышленных предприятий предполагает использование разнотипной электрической нагрузки: асинхронные электродвигатели (АД), термические и гальванические установки, индукционные печи и т.д. Питание таких потребителей электроэнергии (ЭЭ) зачастую осуществляется через статические преобразователи, от одной системы электропитания (СЭС), от одной цеховой подстанции. Режимы потребления ЭЭ, в соответствии с технологическими циклами, у потребителей изменяются независимо друг от друга. В случае, когда СЭС не имеет необходимого запаса установленной мощности трансформатора цеховых подстанций, как

правило, возникают проблемы качества ЭЭ и электромагнитной совместимости (ЭМС) для потребителей по ряду нормативных показателей: уровень высших гармонических, колебания напряжения, уровень асимметрии напряжения, токов и т.д. [1-3].

Наиболее частым случаем является невыполнение критерия качества функционирования потребителей ЭЭ при воздействии электромагнитных помех от работы, например, управляемых выпрямителей или тиристорных регуляторов мощности (создающих мощные электромагнитные помехи). При этом происходит ухудшение функциональных характеристик параллельно работающим асинхронным двигателям во время воздействия помех. Хотя после прекращения воздействия функционирование полностью восстанавливается без каких-либо дополнительных мероприятий, это приводит к ухудшению технико-экономических характеристик производства в целом.

II. Цели и задачи исследования

Учитывая широкое использование статических преобразователей для регулирования разнообразных параметров технологического процесса современных производств, актуальным вопросом является определение путей обеспечения нормативных условий электромагнитной совместимости электрооборудования.

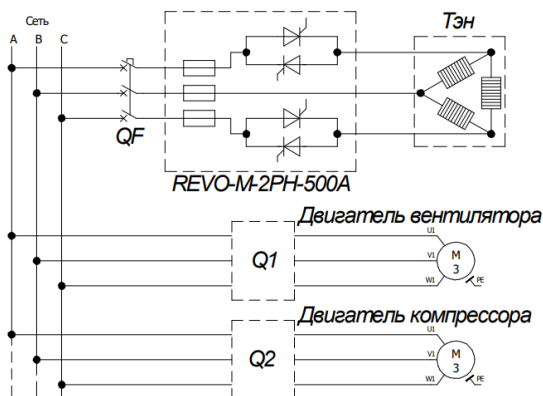


Рис. 1. Схема подключения группы силовых элементов установки автоклава

Fig. 1. Connection diagram of the group of power elements of the autoclave installation

Для анализа данной проблемы в качестве примера будет рассмотрен такой энергоемкий технологический процесс, как автоклавное производство композитных материалов. В типовой установке автоклава присутствуют: станция управления, мощные термоэлектрические нагреватели (управляемые тиристорными регуляторами мощности – ТРМ), асинхронные двигатели вентилятора и компрессора (рис. 1) [4, 5].

Источником электромагнитных помех в данной установке является тиристорный регулятор мощности (ТРМ), который может работать в двух режимах управления. В первом режиме импульсно-фазового управления (ИФУ), изменение нагрева реализуется изменением продолжительности включенного состояния тиристорov в течении каждого полупериода питающего напряжения сети. В этом режиме в питающей сети генерируются высшие гармонические напряжения, вызывающие сбои систем управления и дополнительные потери электроэнергии в силовом оборудовании [6]. Поэтому в управлении ТРМ зачастую используется алгоритм работы тиристорных ключей в формате частотно-импульсного режима. В основе второго (частотно-импульсного) режима управления (ЧИУ) ТРМ лежит алгоритм изменения количества полных интервалов (синхронизированных по напряжению сети) включенного и выключенного состояния термоэлектрических нагревателей (ТЭН).

Включение тиристорных ключей реализуется только в начале выbranного полупериода сетевого напряжения, что исключает появление высших гармонических тока и напряжения. Однако при реализации всего диапазона регулирования ТРМ возникают значительные субгармонические колебания напряжения с частотой 5-25 Гц (фликер), оказывающие негативное воздействие на асинхронные двигатели всего цеха. Влияние такой электромагнитной помехи существенно в случае небольших производств, с ограниченной мощностью цеховой подстанции по отношению к мощности всех потребителей цеха.

III. Решение поставленной задачи

Решение проблемы находится в плоскости выбора экономически обоснованных технических решений, направленных на улучшение характеристик ЭМС электрооборудования, в частности, на асинхронные электродвигатели.

Зачастую нет финансовой и технической возможности значительно увеличить мощность цеховой подстанции или обеспечить раздельное питание статических регуляторов мощности и асинхронных электроприводов. И тогда целесообразно предусмотреть дополнительные технические решения, направленные на улучшения параметров электромагнитной совместимости статических преобразователей в сетях со смешанной нагрузкой.

Так, для промышленных производств, положительный эффект на качество ЭМС оказывает вариант реализации средств индивидуальной компенсации реактивной мощности, позволяющий не только снизить потери ЭЭ от циркуляции реактивных токов в системе электроснабжения, но и значительно уменьшить уровень высших гармонических напряжения [7]. Однако, с учетом затрат на реализацию данного варианта (динамическая компенсация на основе тиристорных конденсаторных установок требует вложений более 42 руб. на каждый кВАр компенсируемой мощности АД), предложено менее затратное техническое решение. Оно находится не в аппаратной (как правило, затратной), а в алгоритмической плоскости.

IV. Теоретическая часть

В рамках существующей структуры силовой части ТРМ группы нагревателей (рис. 1) предложена реализация специального алгоритма, совмещающего основной режим (ЧИУ) работы тиристорных ключей с режимом ИФУ. Структура системы управления, реализующая предложенный алгоритм, основывается на имеющихся типовых блоках системы управления тиристорными ключами (ТК), обеспечивающих описанные выше режимы импульсно-фазового управления (БИФУ) и частотно-импульсного управления (БЧИУ) (рис. 2).

Алгоритм обеспечивает оптимальное (по критерию минимума генерации высших гармонических и уровня субгармонических колебаний напряжения на асинхронной нагрузке) соотношение работы ТРМ в режимах ИФУ и ЧИУ.

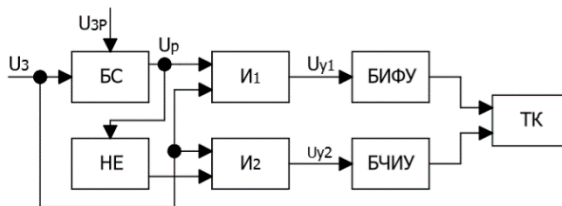


Рис. 2. Блок-схема системы управления тиристорными ключами ТРМ

Fig. 2. Block diagram of the thyristor power regulator's thyristor key control system

При формировании такого алгоритма использовалась методика многофункционального анализа: параметров производственных установок (тип, мощности статических преобразователей и асинхронных двигателей), требований технологии (диапазоны регулирования и быстродействие) и системы электроснабжения (структура, установленные мощности и типы

нагрузок). Реализация подобной методики исследования работы статических преобразователей типа ТРМ (управляемых выпрямителей, тиристорных регуляторов напряжения, устройств плавного пуска) на нагрузку, дают возможность, в первом приближении, определить некий порог перехода от одного режима управления к другому [8, 9]. Этот переход осуществляется при сравнении сигналов задания выходного параметра (действующее значение напряжения на выходе ТРМ) U_z и сигнала задания режима $U_{зр}$ (определяется для конкретного варианта) в блоке сравнения БС. На его выходе формируется дискретный сигнал U_p , который, благодаря логическим элементам «НЕ», «И1», «И2», определяет зону прохождения аналоговых сигналов управления U_{y1} , U_{y2} для блоков БИФУ и БЧИУ.

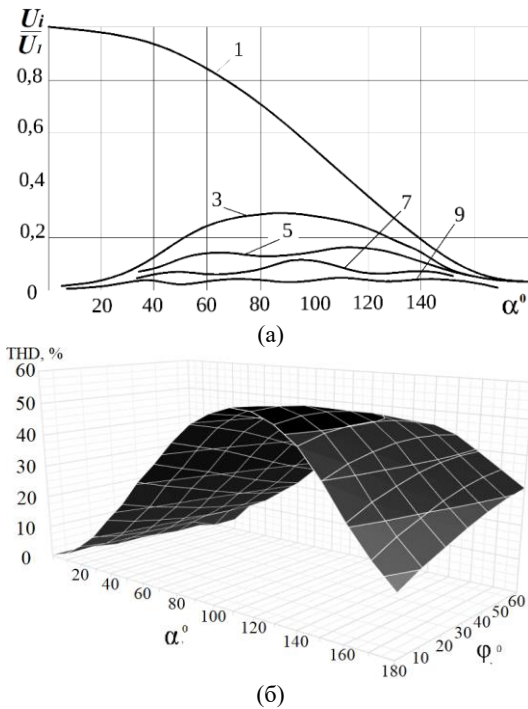


Рис. 3. Зависимости уровня нечетных гармоник напряжения №№ 1-9 (а) и THD напряжения (б) от угла нагрузки и угла управления α в режиме ИФУ

Fig. 3. Dependences of the level of odd voltage harmonics no. 1-9 (a) and voltage THD (b) on the load angle and control angle α in the pulse-phase control mode

Переход работы от одного режима к другому определяется следующими условиями:

Если $U_3 \leq U_{зр}$, то $U_p = 1$ и функционирует режим ИФУ.

Если $U_3 > U_{зр}$, то $U_p = 0$ и функционирует режим ЧФУ.

Для количественной оценки эффективности предложенного алгоритма управления ТРМ и определения оптимальных пороговых значений $U_{зр}$, было проведено имитационное моделирование в программной среде *MatLab Simulink*. Для примера взята промышленная установка автоклавирования *D-48653*, имеющая две группы термоэлектрических нагревателей с *ТРМ REVO M 2Ph* (диапазон регулирования напряжения 24-1000 В, токовая нагрузка – до 500 А) производства *CD Automation* (Италия), каждая мощностью $P = 275$ кВт, вентилятор с асинхронным электроприводом мощностью 45 кВт, запитанные на напряжении 380 В от цеховой подстанции мощностью 630 кВА. С помощью программного блока *Fast fourier transform* были получены данные спектрального состава и суммарного коэффициента ТДН напряжения на шинах питания установки автоклавирования в режиме ИФУ (рис. 3).

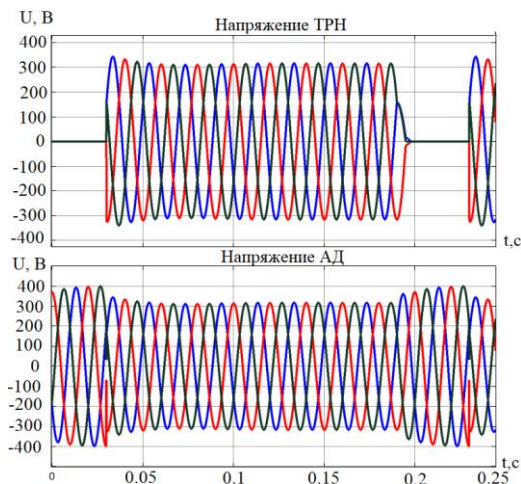


Рис. 4. Диаграмма напряжений U_{cr} на выходе ТРМ в режиме ЧИУ и на входе АД

Fig. 4. Voltage diagram U_{cr} at the thyristor power regulator output in the frequency-pulse control mode and at the input of the asynchronous motor

Имитационное моделирование для всех вариаций режимов работы ТРМ, АД и мощности питающей цеховой подстанции дает возможность

оценки величины субгармонических колебаний напряжения U_{cr} на входе АД при режиме ЧИУ (пример работы ТРМ в режиме 80 % номинальной мощности, тактовый интервал в 10 периодов напряжения при включенных ТЭН в течении 8 периодов напряжения (рис. 4).

Анализ полученных результатов имитационного моделирования позволяет определить оптимальное значение сигнала задания режима $U_{зр}$, в соответствии с ранее предложенными критериями, в пределах $(0,2-0,35) U_3$ max. При этом уровень коэффициента нелинейных искажений от высших гармонических ТНД и субгармонических колебаний напряжения U_{cr} на выходе ТРМ не превышает нормативные показатели ($THD \leq 8 \%$, $U_{cr} \leq 10\%$) во всем диапазоне регулирования мощности ТЭН автоклава, в соответствии с ГОСТ [1, 2].

VI. Практическая значимость

Основные практические результаты состоят в части реализации проектными и производственными организациями, занимающимися разработкой, модернизацией и выпуском статических преобразователей рассмотренного выше типа, схемотехнических решений по использованию предложенного алгоритма оптимального, с точки зрения ЭМС и режима их работы. Реализация предложенных аппаратных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне широкого класса энергоемких промышленных производств.

VII. Заключение

Для достижения нормируемого уровня ЭМС электрооборудования в производствах со смешанной нагрузкой необходима дополнительная корректировка режима работы статических преобразователей.

При критериальной оценке оптимального (с точки зрения норм ЭМС) режима работы целесообразен учет не только энергоэкономических факторов, но и связанных с ними факторов качества электроснабжения потребителей – уровня генерации высших гармонических и колебаний напряжения. Для статических преобразователей, использующих принципы импульсно-фазового и частотно-импульсного управления целесообразно реализовать возможность изменения типа управления в режиме реального времени технологического процесса.

Предложен алгоритм работы системы управления статическими преобразователями типа ТРМ, обеспечивающий основные нормируемые показатели качества ЭМС во всем диапазоне регулирования мощности: $THD \leq 8 \%$, $U_{cr} \leq 10 \%$.

Определены методика выбора и основные факторы влияния на величину уставки перехода от режима частотно-импульсного управления к режиму импульсно-фазового управления статических регуляторов мощности. Как правило, величину уставки изменения режима, целесообразно задавать в диапазоне $(0,2-0,35) U_{з \max}$.

© Крысанов В.Н., 2021

© Хайченко И.А., 2021

© Бабенко В.В., 2021

© Нефедов Ю.В., 2021

Поступила в редакцию 24.02.2021

Received 24.02.2021

Библиографический список

- [1] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
- [2] 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. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартиформ, 2020. – 12 с.
- [3] ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Введ. 2012-09-01. М.: Стандартиформ, 2020. – 56 с.
- [4] Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3 (20). С. 20–26.
- [5] Крысанов В.Н., Нефедов Ю.В., Романов А.В. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 77-81. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.009.
- [6] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Исследования влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронного двигателя // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 2. С. 6-11.
- [7] Нефедов Ю.В., Хайченко И.А., Бабенко В.В. Повышение энергоэффективности силового оборудования автоклавных установок // Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы и современные тенденции развития науки: от теоретических парадигм к практике». М.: НИЦ МИСИ, 2020.
- [8] Крысанов В.Н. Зависимость гармонического состава напряжений высоковольтного регулятора от режимов управления // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. № 3. С. 16-18.

- [9] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б., Дурнев С.А. Анализ гармонического состава выходного напряжения математической модели статического регулятора // Труды Всерос. студ. науч.-техн. конф. «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники». Инженерные идеи XXI века. Воронеж: ВГТУ, 2013. С. 157-159.

References

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [2] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Voltage fluctuations and flicker caused by equipment with rated current 75 A (per phase) connected to low-voltage supply systems under certain conditions. Limits and test methods. GOST 30804.3.11-2013, Jan. 2014.
- [4] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Terms and definitions. GOST R 50397-2011, Sept. 2012.
- [4] M.I. Dushin, A.V. Khrulkov and R.R. Mukhametov, "Selected technological parameters for the autoclave molding of polymer composites materials", *Aviation Materials and Technologies*, no. 3 (20), pp. 20-26, 2011.
- [5] V.N. Krysanov, Yu.V. Nefedov and A.V. Romanov, "EMC parameters control of modernized equipment of autoclave installation", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 15, no. 2, pp. 77-81, 2019. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.009.
- [6] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, "Issledovanie vliyaniya nesinusoidal'nosti pitayushchego napryazheniya na energeticheskie harakteristiki asinhronnogo dvigatelya [Research on the effect of non-sinusoidity of supply voltage on the energy characteristics of an asynchronous motor]", *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrical Complexes and Control Systems]*, no. 2. pp. 6-11, 2014 (in Russian).
- [7] Yu.V. Nefedov, I.A. Khaychenko and V.V. Babenk, "Povyshenie energoeffektivnosti silovogo oborudovaniya avtoklavnyh ustanovok [Improving energy efficiency of power equipment of autoclave plants]", in proc. *Int. conf. «Aktual'nye problemy i sovremennye tendencii razvitiya nauki: ot teoreticheskikh paradig k praktik [Current problems and modern trends in the development of science: from theoretical paradigms to practice]»*. Moscow: ICI Research Center, 2020 (in Russian).
- [8] V.N. Krysanov, "Dependence of the harmonic composition of voltages of the high-voltage regulator on control modes", *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrical Complexes and Control Systems]*, no. 3, pp. 16-18, 2009 (in Russian).
- [9] V.N. Krysanov, A.B. Kirilov and S.A. Durnev, Analiz garmonicheskogo sostava vyhodnogo napryazheniya matematicheskoy modeli staticheskogo regulyatora [Analysis of harmonious structure of output voltage of mathematical model of the static regulator]", in proc. *All-Russian students scientific and technical conf. "Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki. Inzhenernye idei XXI veka [Applied Problems of Electromechanics, Power, Electronics Engineering ideas of the 21st century]*", 2013, Voronezh, Russia, pp.157-159 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Крысанов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, директор ООО ПКФ «Современные Технологии», г. Воронеж, Российская Федерация.

Valery N. Krysanov, Cand. Sci. (Eng.), director of the LLC PKF "Modern Technologies", Voronezh, Russian Federation.

Хайченко Илья Александрович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Иуа А. Khaichenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Бабенко Владимир Владимирович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Vladimir V. Babenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Нефедов Юрий Васильевич, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Yuri V. Nefedov, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_31

МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ТАРИФА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.В. Кузнецов

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Россия
kav2@ulstu.ru

Д.А. Ребровская

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Россия
diana-06-08@mail.ru

В.В. Чикин

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Россия
chikin_vladislav@mail.ru

Стимулирующие тарифы давно и успешно широко применяются в мировой практике. В РФ базовый тариф на электроэнергию для потребителей является стимулирующим только для режима потребления активной мощности, который этим тарифом не управляется. Для расширения функциональных возможностей базового тарифа в части управления режимом потребления реактивной мощности предлагается его дифференцирование методом компенсационной составляющей.

Предложенная модель не требует изменений в действующую систему тарифообразования в РФ. Для использования модели требуется только дополнение системы тарифообразования новыми документами, связанными с расчетами и использованием стимулирующей части тарифа, а также его компенсационной составляющей. Предложена методика расчета стимулирующей части тарифа, включающая расчет устанавливаемого тарифа на потребляемую реактивную энергию, обеспечивающего доходность инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств.

Ключевые слова: активная мощность, базовый тариф, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, потребитель электроэнергии, реактивная мощность, стимулирующий тариф.

Для цитирования: Кузнецов А.В., Ребровская Д.А., Чикин В.В. Модель дифференцированного тарифа для управления режимом потребления реактивной мощности // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 31-52. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_31

MODEL OF DIFFERENTIATED TARIFF FOR CONTROL OF REACTIVE POWER CONSUMPTION

A.V. Kuznetsov

Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia
kav2@ulstu.ru

D.A. Rebrovskaya

Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia
diana-06-08@mail.ru

V.V. Chikin

Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia
chikin_vladislav@mail.ru

Abstract. Incentive tariffs are widely used in world practice. These tariffs have successfully fulfilled and are fulfilling their purpose, both in the past and at the present time. In the Russian Federation, the base tariff for electricity for consumers is stimulating only for the mode of consumption of active power. The mode of consumption of reactive power is not controlled by this tariff. To expand the functionality of the base rate, in terms of controlling the mode of consumption of reactive power, it is proposed to differentiate it by the method of the compensation component.

The proposed model does not require changes to the current tariff setting system in the Russian Federation. To use the model, it is only necessary to supplement the tariff setting system with new documents related to the calculations and use of the incentive part of the tariff and its compensatory component. A method for calculating the incentive part of the tariff is proposed, including the calculation of the established tariff for consumed reactive energy, which ensures the profitability of the investment project of installing compensating devices.

Keywords: active power, base tariff, electricity consumer, incentive tariff, power factor, reactive power, reactive power compensation.

For citation: A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya and V.V. Chikin, "Model of differentiated tariff for control of reactive power consumption", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 31-52, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_31

1. Режим потребления активной и реактивной мощности и его роль в формировании себестоимости производства и передачи электроэнергии

В электротехнической системе производства, передачи и потребления электроэнергии технологический процесс резко отличается от аналогичного для обычных товаров, где затраты определяются производителем. Затраты, связанные с передачей, в последнем случае определяются транспортной компанией и могут оптимизироваться за счет совершенствования организации производства, применения новых технологий и т.д. Особенность технологического процесса производства и передачи электроэнергии заключается в том, что на затраты, связанные с производством и передачей, влияют все участники процесса, в том числе, потребители электроэнергии. От того, как отличается интенсивность потребления электроэнергии в разное время суток, какие электроприемники использует потребитель, какова загрузка электроприемников и т.п., зависят параметры режима потребления электроэнергии. Роль потребителя в регулировании режимов достаточно велика. Соответственно, велика и его роль в снижении затрат на производство и передачу электроэнергии.

Особенности процесса потребления электроэнергии вызывают характерные специфические затраты на строительство и содержание мощностей, обеспечивающих производство электроэнергии сверх необходимых среднесуточных значений, и требуют затрат на средства регулирования количества произведенной электроэнергии в соответствии с потреблением. Указанные затраты увеличивают себестоимость производства электроэнергии. Ее снижение невозможно без участия потребителей. Именно они определяют суточный график производства электроэнергии, который, как правило, имеет резко выраженный пиковый характер. Его выравнивание позволяет снизить стоимость производства электроэнергии. Степень равномерности суточного графика нагрузки характеризуется коэффициентом заполнения k_3 , представляющим собой отношение потребленной электроэнергии к максимальной мощности, умноженной на время, равное 24 часам. Таким образом, себестоимость производства, $b_{\text{пр}}$ зависит от коэффициента заполнения суточного графика [1]:

$$b_{\text{пр}} = F(k_3). \quad (1)$$

Потенциально регулируемым параметром режима потребления электроэнергии, определяющим значение k_3 в (1), является мощность или электроэнергия, потребляемая в часы максимума нагрузки энергосистемы. Организационные мероприятия позволяют снижать потребление в часы максимума нагрузки энергосистемы за счет увеличения потребления в другие часы суток, т.е., увеличивать значение k_3 и снижать значение $b_{\text{пр}}$.

Процесс передачи электроэнергии характеризуется коэффициентом мощности. Он представляет собой отношение потребляемой реактивной мощности к активной мощности. Электроприемники потребителей, наряду с активной мощностью, потребляют необходимую реактивную мощность из сети. Особенностью процесса передачи электроэнергии является возможность производить реактивную мощность непосредственно потребителями без особых затрат. В этом случае необходимость ее передачи по сетям электросетевой организации (ЭСО) отсутствует. Снижаются потери при передаче активной мощности как по сетям потребителя, так и по сетям ЭСО. Разгрузка сетей от передачи реактивной мощности дает возможность увеличения пропускной способности ЛЭП. Она производится с помощью специальных устройств компенсации реактивной мощности (КРМ), устанавливаемых в сети потребителя.

Для достижения максимального эффекта работа компенсирующих устройств должна быть синхронизирована с изменением нагрузки потребителя. В любой момент времени мощность компенсирующих устройств Q_k , подключенная к сети, должна соответствовать реактивной составляющей потребляемой мощности. Коэффициент мощности поддерживается на уровне нормативного значения [2]. В этом случае потери электроэнергии от источника энергии до места установки компенсирующих устройств минимальны, в противном случае они увеличиваются. Потребитель режимом работы своих компенсирующих устройств оказывает влияние на потери электроэнергии и себестоимость передачи электроэнергии $b_{\text{пер}}$ [1]:

$$b_{\text{пер}} = dP(Q_k). \quad (2)$$

Потенциально регулируемые параметрами режима потребления реактивной мощности, определяющими значение Q_k в (2), являются: значение реактивной мощности в часы максимума нагрузки энергосистемы, потребляемая реактивная энергия в часы больших нагрузок, потребляемая реактивная энергия в часы малых нагрузок, генерируемая в сеть реактивная энергия. Установка в сети компенсирующих устройств и регулирование названных параметров снижает затраты на передачу электроэнергии.

2. Дифференцированные тарифы для управления режимом потребления активной мощности

Несомненна необходимость привлечения потребителей к участию в регулировании режимов потребления активной и реактивной мощности [3]. Нужен специальный механизм. Рыночные взаимоотношения между сбытовыми организациями и потребителями, основанные на конкуренции, не обеспечивают привлечения потребителей к участию в регулировании режимов потребления активной и реактивной мощности. С точки зрения бизнеса, субъекты рынка не заинтересованы в этом: основной задачей коммерческой

организации является получение прибыли. Производителю безразличен режим потребления и передачи, ЭСО заинтересована в увеличении объема передачи электроэнергии. Регулирование режимов связано со снижением объемов производства и передачи, снижением тарифов на электроэнергию. Как производитель, так и ЭСО, не заинтересованы в снижении расхода невосполняемого запаса топлива, снижении потерь.

Для участия в режиме регулирования потребителю необходимы, прежде всего, материальные затраты: установка технических систем мониторинга электроэнергии по структурным подразделениям, установка и эксплуатация компенсирующих устройств. Реализация таких проектов возможна только на основании технико-экономического обоснования, привлечения инвесторов, реализации энергосервисных контрактов. У потребителя нет источника дохода от реализации таких проектов. Как потребитель должен реализовать невыгодный проект? При отсутствии каких-либо механизмов возврата потребителю вложенных средств привлечь потребителей к участию в регулировании режимов невозможно.

В силу изложенных обстоятельств, управление режимами потребления активной и реактивной мощности осуществляется государственными органами. Используется модель тарифообразования, технический регламент и правовые методы воздействия, с учетом этого создаются сложные стимулирующие тарифы. Целью их применения является создание выгодных условий для потребителя, участвующего в регулировании режима. Регулируемый параметр может изменяться потребителем организационными, административными и техническими средствами. Регулируя значение параметра, потребитель уменьшает оплату за электроэнергию. Большая плата за электроэнергию обеспечивается для тех потребителей, которые не принимают участие в регулировании параметров режима, меньшая плата – для потребителей, участвующих в регулировании режимов. Стимулирующие тарифы широко применяются в мировой практике.

Примером тарифа, стимулирующего участие потребителя в регулировании режима потребления активной мощности, служит двухставочный тариф. Он успешно используется в РФ на протяжении длительного периода времени. Регулируемым параметром в тарифе является мощность, потребляемая в часы максимума нагрузки энергосистемы. Потребителю предоставляется возможность снижать потребление мощности при неизменном потреблении электроэнергии за счет выравнивания графика нагрузки или смещения максимума на другие часы суток. При этом повышается значение коэффициента заполнения суточного графика нагрузки $k_{\text{зап}}$. Если предположить, что коэффициент заполнения суточного графика $k_{\text{зап}}$ в течение месяца одинаковый, среднемесячный абонентский тариф $C_{\text{аб}}$, руб/кВт·ч при оплате электроэнергии по двухставочному тарифу будет составлять:

$$C_{аб} = \frac{C_m}{k_{зап} \cdot T} + C_3, \quad (3)$$

где C_m – ставка тарифа за мощность, руб/кВт в месяц; C_3 – ставка тарифа за электроэнергию, руб/кВт·ч; T – время расчетного периода в часах (число часов в месяце).

Ставка тарифа за мощность определяет значение стимулирующей части тарифа. Например, при увеличении $k_{зап}$ с 0,25 до 1 средний тариф уменьшается более чем наполовину. Эффективность воздействия двухставочного тарифа достаточно высокая. Другим стимулирующим тарифом является тариф, дифференцированный по зонам суток. Его эффективность обеспечивается повышенной ставкой за потребленную электроэнергию в часы максимума нагрузки энергосистемы. Значение тарифа определяется как:

$$C_{аб} = C_{3,1} \cdot d_1 + C_{3,2} \cdot d_2 + C_{3,3} \cdot d_3, \quad (4)$$

где $C_{3,1}$, $C_{3,2}$, $C_{3,3}$ – ставки тарифа за электроэнергию по зонам суток (пиковая, полупиковая, ночная зона), руб/кВт·ч; d_1 , d_2 , d_3 – доля потребленной электроэнергии по зонам суток ($d_1 + d_2 + d_3 = 1$).

Повышенная ставка тарифа в пиковые часы нагрузки энергосистемы и пониженная ставка в ночные часы стимулирует потребителя снижать потребляемую мощность в часы максимума нагрузки энергосистемы и увеличивать $k_{зап}$. Функции (3, 4) представляют собой базовый тариф:

$$C_{аб} = C_{баз}. \quad (5)$$

Он рассчитывается на основании действующей системы тарифообразования. Тариф является индивидуальным и стимулирующим для каждого потребителя. Утверждаемые тарифные ставки являются управляющими факторами.

3. Дифференцированный тариф для управления режимом потребления реактивной мощности

К сожалению, в настоящее время действующая система тарифообразования не предусматривает дифференцирование тарифа на составляющие, связанные с передачей потребителю реактивной мощности. Работы по дифференцированию базового тарифа на составляющие ведутся [4, 5]. Они связаны с созданием новой модели тарифообразования и являются важными и необходимыми как с теоретической, так и с эмпирической точек зрения. Практического применения эти разработки пока не получили.

Попытки управления режимом потребления реактивной мощности в сети потребителя посредством скидок и надбавок к базовому тарифу имели место в РФ на рубеже перехода к рыночной экономике [6]. Впоследствии скидки (надбавки) были отменены как не соответствующие действующему

законодательству [7]. В настоящее время уровни реактивной мощности в электроэнергетической системе регулируются техническим регламентом [2]. Применение повышающих коэффициентов к базовому конечному тарифу для потребителя предусмотрено в [8, п. 16] и [9]. Однако действие [9] фактически приостановлено [10]. Применение надбавки к конечному тарифу в виде повышающего коэффициента трактуется потребителем как оплата передаваемой ему реактивной мощности сверх нормативных значений. При этом потребитель уже оплатил эту услугу в базовом конечном тарифе. Двойная оплата одной и той же услуги отрицает правомерность применения повышающих коэффициентов [11]. Взимание платы за передачу сверхнормативных значений реактивной мощности в виде надбавки может не вызывать сомнения, если базовый тариф не будет включать в себя эту оплату. Это возможно при дифференцировании базового тарифа на составляющие, одна из которых будет стимулирующей, учитывающей затраты сетевой организации на передачу потребителю сверхнормативных значений реактивной мощности.

На практике до настоящего времени механизм стимулирования потребителей отсутствует [10]. Потребители не устанавливают компенсирующие устройства, потери в электроэнергетической системе возрастают. Есть необходимость вернуться к обозначенной теме [12].

4. Классическая схема разложения базового тарифа на необходимые составляющие

Классическая схема разложения базового тарифа на необходимые составляющие, обеспечивающие регулирование режима потребления реактивной мощности, представлена на рис. 1. Базовый тариф на электроэнергию является довольно сложным и содержит затраты на производство электроэнергии и на ее передачу, которые включают в себя затраты на содержание электрических сетей, оплату потерь электроэнергии, возникающих при ее передаче, затраты на диспетчерские услуги и бытовую надбавку. На рис. 1 базовый абонентский тариф на производство и передачу активной и реактивной энергии разложен на составляющие. Первая составляющая связана с затратами на производство электроэнергии, вторая – с затратами на передачу активной и реактивной энергии до нормативных значений, третья составляющая представляет усредненные затраты на передачу сверхнормативных значений реактивной энергии всеми потребителями ЭСО. Она разлагается на ряд составляющих для каждого конкретного потребителя, являющихся стимулирующей частью базового тарифа.

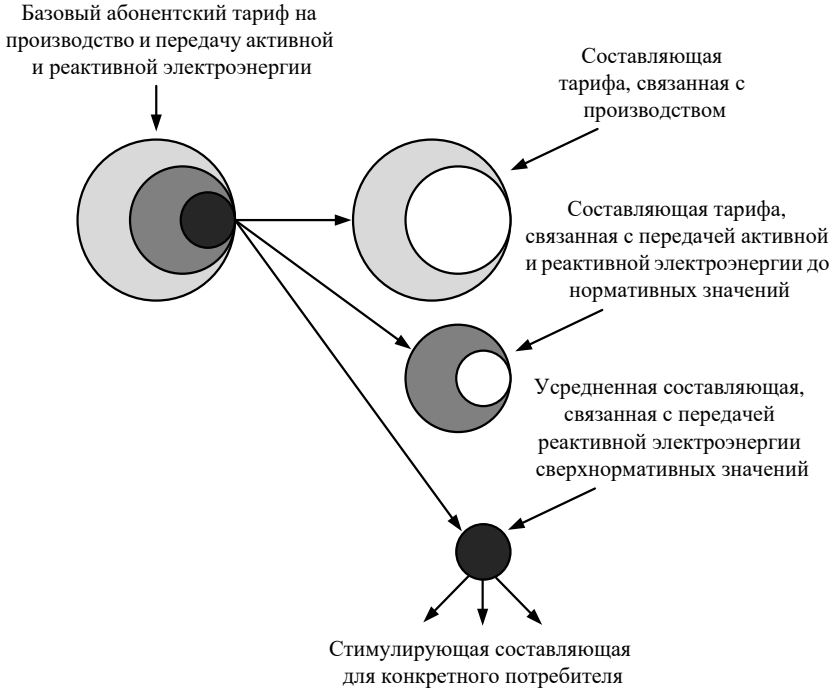


Рис. 1. Традиционный метод дифференцирования тарифа

Fig. 1. Traditional method of tariff differentiation

Определение значений составляющих связано с большими трудностями. Составляющие, связанные с передачей реактивной энергии, растворяются в базовом тарифе. Их значения невозможно определить без пересмотра системы тарифообразования. Однако замена системы тарифообразования на новую – процесс сложный, с возможными непредсказуемыми проблемами. Он требует времени, соответствующей ситуации, например, когда имеющаяся система тарифообразования потеряет эффективность и будет непригодна для дальнейшего использования. Система тарифообразования содержит методики расчета двухставочного тарифа и тарифа, дифференцированного по зонам суток. Эти методики долгое время совершенствовались, прошли проверку временем, успешно используются на практике.

5. Схема разложения базового тарифа методом компенсационной составляющей

Авторами предлагается не ломать кардинально систему тарифообразования и не менять методики расчета базового тарифа. Путь решения поставленной задачи представлен на рис. 2.

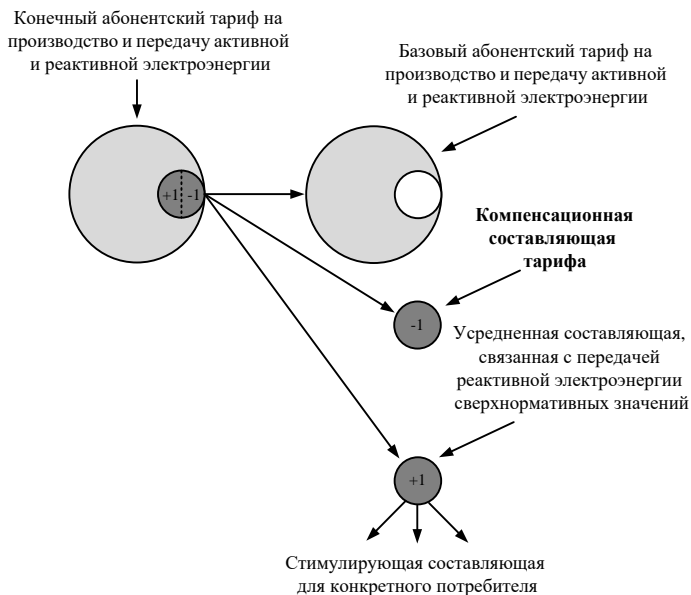


Рис. 2. Дифференцирование тарифа методом компенсационной составляющей

Fig. 2. Differentiation of the tariff using the compensation component method

Целесообразно оставить базовый тариф без изменения и рассматривать его как одну из составляющих формулы конечного абонентского тарифа. Второй составляющей является та, которая связана с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверх нормативных значений всем потребителям ЭСО. Она разлагается на ряд составляющих, представляющих стимулирующую часть тарифа для каждого конкретного потребителя. Очевидно, что их сумма превышает значение базового тарифа, и необходимо ее сбалансировать дополнительным слагаемым с отрицательным

знаком. Его можно назвать компенсационной составляющей тарифа, значение которой принимается равным значению второй составляющей связанной с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверх нормативных значений всем потребителям ЭСО.

Регулируемым параметром в тарифе удобнее всего принять значение реактивной энергии, потребляемой сверхнормативных значений. В настоящее время нормативное значение определяется значением предельного $\text{tg}\varphi$ [2]. Составляющую тарифа, связанную с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверхнормативных значений всем потребителям ЭСО, можно представить как:

$$C_{\text{аб,пер},Q} = C_{W,Q} \cdot \frac{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n W_{P,i}}, \quad (6)$$

где $C_{W,Q}$ – тариф на потребляемую за расчетный период реактивную энергию $W_{Q,i}$, руб/квар·ч; $W_{P,i}$ – потребляемая за расчетный период активная энергия, кВт; $\Delta W_{Q,i}$ – превышение фактически потребляемой за расчетный период реактивной энергии $W_{\phi,i}$ над нормируемым значением $W_{\text{норм},i}$, квар:

$$\Delta W_{Q,i} = W_{\phi,i} - W_{\text{норм},i}. \quad (7)$$

Значение потребляемой реактивной энергии $W_{\phi,i}$ определяется по приборам учета. На рис. 3 представлено дифференцирование базового тарифа на составляющие. Составляющая (6) базового тарифа представляется затратами, связанными исключительно с передачей сверхнормативных значений реактивной энергии. Вторая составляющая тарифа определяется по остаточному принципу. Ее можно трактовать как не связанную с затратами на передачу сверхнормативных значений реактивной мощности:

$$C_{\text{аб,ОСТ}} = C_{\text{баз}} - C_{\text{аб,пер},Q}. \quad (8)$$

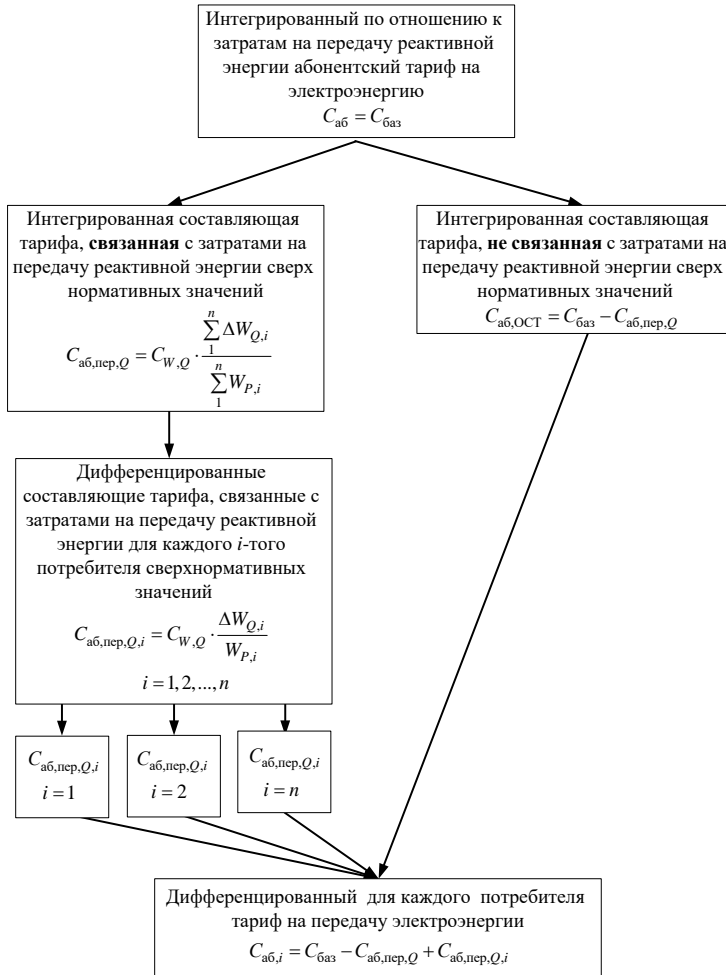


Рис. 3. Дифференцирование базового тарифа на составляющие

Fig. 3. Differentiation of the base tariff into components

Очевидно, что составляющая (6) не обладает управляющим эффектом для каждого из потребителей, ее необходимо дифференцировать в пределах ЭСО.

6. Дифференцирование тарифа на передачу сверхнормативных значений реактивной электроэнергии между потребителями

Составляющая (6) базового тарифа может быть дифференцирована для каждого потребителя ЭСО следующим образом. Определяется доход ЭСО D_1 от применения (6):

$$D_1 = C_{W,Q} \cdot \frac{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n W_{P,i}} \cdot \sum_1^n W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (9)$$

Полученное значение дохода распределяется между потребителями ЭСО:

$$D_i = C_{W,Q} \cdot \Delta W_{Q,i}. \quad (10)$$

Тогда стимулирующая часть тарифа для каждого потребителя будет равна:

$$C_{аб,пер,Q,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \frac{\Delta W_{Q,i}}{W_{P,i}}. \quad (11)$$

Сумма дохода от применения стимулирующей части тарифа:

$$D_2 = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \frac{\Delta W_{Q,i}}{W_{P,i}} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (12)$$

Равенство доходов (9) от применения (6) и дохода (12) от применения (11) подтверждают корректность дифференцирования составляющей тарифа (6). Далее, при сложении двух составляющих $C_{аб,пер,Q,i}$ и $C_{аб,пер,ост}$ тарифа после простейших математических преобразований получим выражения для дифференцированного тарифа, включающего в себя стимулирующую составляющую $C_{аб,пер,Q,i}$ для каждого потребителя ЭСО:

$$C_{аб,i} = C_{баз} - C_{аб,пер,Q} + C_{аб,пер,Q,i}. \quad (13)$$

7. Анализ формулы дифференцированного тарифа для управления режимом потребления реактивной мощности

В (13): $C_{\text{баз},i}$ – базовая составляющая тарифа, представляющая собой действующий тариф за электроэнергию для потребителя. Он может быть одноставочным, двухставочным, дифференцированным по зонам суток. $C_{\text{баз},i}$ рассчитывается, утверждается и применяется в соответствии с действующими нормативными документами на розничном рынке. Этот тариф отражает затраты на производство и передачу электроэнергии как активной, так и реактивной. Он включает оплату передачи реактивной энергии как до нормативных значений, так и превышений до фактических значений, затраты на диспетчерские услуги и сбытовую надбавку. $C_{\text{аб,пер},Q,i}$ – это стимулирующая составляющая, представляющая собой оплату превышения потребления реактивной энергии за расчетный период каждым потребителем.

$$O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q,i} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \Delta W_{Q,i} = d_{1,i} \cdot C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}, \quad (14)$$

где $d_{1,i} = \frac{\Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}$ – доля превышения нормативного значения реактивной

энергии i -тым потребителем ЭСО, $\sum_1^n d_{1,i} = 1$.

Стимулирующая составляющая $C_{\text{аб,пер},Q,i}$ тарифа индивидуальна для каждого потребителя. Оплата по ней зависит от установленного тарифа на передачу реактивной энергии $C_{W,Q}$ и объема превышения потребляемой реактивной энергии над нормативным значением $\Delta W_{Q,i}$. Она может быть уменьшена в результате установки компенсирующих устройств в системе электроснабжения потребителя до нулевого значения. Этим достигается управляющий эффект, стимулирующий потребителя участвовать в регулировании режима потребления реактивной мощности. Для ЭСО эта оплата представляется доходом, сумма которого составляет:

$$\sum_1^n O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q} \cdot \sum_1^n W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (15)$$

Очевидно, что доход (15) предусмотрен в базовом тарифе $C_{\text{аб,баз}}$ и оплачивается потребителем. Применение же (11) дополнительно к базовому тарифу связано с повторной оплатой услуги по передаче реактивной мощности. Это недопустимо и противоречит здравому смыслу. Чтобы не допустить этого, предусматривается компенсационная составляющая тарифа. $C_{\text{аб,пер},Q}$ – компенсационная составляющая тарифа (отрицательный тариф). Ее связь с тарифом $C_{\text{аб,пер},Q,i}$ выражается следующим соотношением:

$$\frac{C_{\text{аб,пер},Q,i}}{C_{\text{аб,пер},Q}} = \frac{d_{1,i}}{d_{2,i}}, \quad (16)$$

где $d_{2,i} = \frac{W_{P,i}}{\sum_1^n W_{P,i}}$ – доля потребления i -тым потребителем ЭСО активной

электроэнергии, $\sum_1^n d_{2,i} = 1$.

Оплата по составляющей $C_{\text{аб,пер},Q}$ тарифа предусмотрена как бы потребителю от ЭСО. Возврат части дохода от применения $C_{\text{аб,пер},Q,i}$. Эта часть определяется долевым участием потребителя в потреблении активной электроэнергии.

$$O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i} \cdot d_{2,i}, \quad (17)$$

Сложив доходы каждого потребителя от ЭСО, получим значение компенсации:

$$\sum_1^n O_{W,Q,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i} \cdot \sum_1^n d_{2,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что компенсационная составляющая полностью обеспечивает компенсацию доходов ЭСО, полученных от применения $C_{\text{аб,пер},Q,i}$ (11).

Выражение $C_{\text{аб},P,i} = C_{\text{баз}} - C_{\text{аб,пер},Q}$ представляет оплату производства и передачи активной и реактивной электроэнергии, но только до нормативных значений всеми потребителями ЭСО. Эта часть тарифа вычислена по остаточному принципу. Она могла бы быть утверждаемым тарифом для потребителей вместо $C_{\text{баз}}$. В таком случае компенсационная составляющая не будет отражаться в тарифе, однако это связано с рядом неудобств. Одно из них – утверждение тарифа, отличного от базового. Каким образом уменьшить тариф, если он двухставочный или дифференцированный по зонам суток? Требуется пересмотр методики расчета базового тарифа, т.е., некоторые изменения в систему тарифообразования, хотя бы частичные.

Другой вариант: компенсационная составляющая тарифа должна присутствовать в тарифе для потребителей, наряду с базовой и оплатой, потребляемой сверхнормативных значений реактивной энергии. При применении такого тарифа необходимо разъяснить потребителям и общественности физический смысл всех его составляющих. Базовый тариф в разъяснениях не нуждается. Стимулирующую составляющую можно трактовать как надбавку к базовому тарифу за потребление сверхнормативных значений

реактивной энергии. Тогда компенсационная составляющая может трактоваться как скидка к базовому тарифу за участие в регулировании режима реактивной мощности в электроэнергетической системе. Она представляет собой возврат части дохода ЭСО каждому потребителю от применения надбавок к тарифу.

В данном случае в систему тарифообразования потребуется внести некоторые дополнения, связанные с надбавками и скидками. Тарифы $C_{аб,пер,Q,i}$ и $C_{аб,пер,Q}$ должны рассчитываться и утверждаться государственными органами регулирования тарифов на региональном уровне (ранее – Региональная энергетическая комиссия, Региональная служба по тарифам, ныне – Департамент по регулированию цен и тарифов) подобно базовому тарифу. При этом региональные органы регулирования должны руководствоваться методикой расчета $C_{аб,пер,Q,i}$ и $C_{аб,пер,Q}$, которая разрабатывается и утверждается органами регулирования тарифов на федеральном уровне (Федеральная энергетическая комиссия, Федеральная служба по тарифам, ныне – Федеральная антимонопольная служба).

Региональным органом, наряду с утверждением базового тарифа, утверждается значение $C_{аб,пер,Q}$ и методика расчета $C_{аб,пер,Q,i}$ для потребителей региона на период регулирования. Расчеты за потребление электроэнергии ведутся по традиционной установившейся схеме с энергоснабжающей организацией (гарантирующий поставщик, сбытовая организация и т.д.) по составляющим тарифа, включающим в себя базовый тариф, $C_{аб,пер,Q,i}$ и $C_{аб,пер,Q}$. Необходимые для расчета $C_{аб,пер,Q,i}$ и $C_{аб,пер,Q}$ значения потребленной активной и реактивной мощности и энергии определяются по приборам коммерческого учета.

Указанные дополнения не требуют изменения структуры тарифообразования, методики расчета и механизма применения базового тарифа на практике. Данный вариант является более предпочтительным. Немаловажным для стимулирующего эффекта является значение стимулирующей составляющей тарифа.

8. Расчет значения стимулирующей составляющей дифференцированного тарифа

Степень эффективности управляющего воздействия на потребителя в части установки компенсирующих устройств определяется значением стимулирующей составляющей тарифа (11). Ее же значение напрямую зависит от устанавливаемого значения тарифа на потребляемую реактивную энергию $C_{w,Q}$. Именно эта величина является управляющим фактором, обеспечивающим стимулирующий эффект [13]. Он обеспечивается, если срок окупаемости инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств будет приемлемым для инвестора. В период плановой экономики

нормативный срок окупаемости составлял 8 лет. В настоящее время для инвестора приемлемым сроком окупаемости можно считать срок не более 3 лет. Срок окупаемости проекта установки компенсирующих устройств для ЭСО в целом можно определить следующим образом:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum_1^n I_{\text{КУ}}}{C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}} - \sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}}, \quad (19)$$

где $\sum_1^n I_{\text{КУ}}$ – инвестиции в установку компенсирующих устройств, мощность которых $\sum_1^n Q_{\text{КУ}}$ обеспечивает компенсацию реактивной энергии у потребителей до нормативных значений, руб; $\sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}$ – эксплуатационные издержки на обслуживание компенсирующих устройств, руб/год.

Из (19) получаем:

$$C_{W,Q} = \frac{\sum_1^n I_{\text{КУ}}}{T_{\text{ок}} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}}} + \frac{\sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}}{\sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}}}. \quad (20)$$

Тариф на реактивную энергию включает в себя инвестиции. Они могут определяться из следующих соображений: это мощность, обеспечивающая КРМ в ЭСО до нормативных значений. Очевидно, что в часы максимума нагрузки энергосистемы потребляемая реактивная мощность достигает максимальных значений. Для ее компенсации до нормативных значений требуется определенная мощность компенсирующих устройств. Такая мощность и должна быть установлена в ЭСО и распределена среди потребителей. Эта мощность в другие часы суток может регулироваться в соответствии с потреблением реактивной мощности путем отключения части конденсаторных батарей. Необходимая мощность компенсирующих устройств в ЭСО определяется следующим образом.

Ставится задача скомпенсировать реактивную электроэнергию до нормативного значения. При этом потребуются компенсирующие устройства, суммарная мощность которых в ЭСО определяется как:

$$\sum_1^n Q_{\text{КУ}} = \sum_1^n Q_{\text{МАКС}} - \sum_1^n Q_{\text{НОРМ}} = \sum_1^n P_{\text{М}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ф}} - \sum_1^n P_{\text{М}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{НОРМ}}. \quad (21)$$

Для определения инвестиций или стоимости компенсирующих устройств, суммарная мощность которых составляет $\sum_1^n Q_{KV}$, удобно пользоваться удельной стоимостью компенсирующих устройств α (руб/квар). Во времена плановой экономики этот показатель широко использовался для экономических расчетов. В настоящее время при свободных ценах на товарную продукцию этот показатель не является постоянным и изменяется в соответствии с конъюнктурой рынка. Тем не менее, он может быть определен и корректироваться с течением времени. При использовании этого показателя инвестиции в компенсирующие устройства можно определить следующим образом:

$$\sum_1^n I_{KV} = \alpha \cdot \sum_1^n Q_{KV}. \quad (22)$$

Эксплуатационные расходы приближенно могут быть оценены процентным соотношением к инвестициям, например, равным 10 % от стоимости компенсирующих устройств. Тогда:

$$C_{W,Q} = \frac{1,1 \cdot \alpha \cdot \sum_1^n Q_{KV}}{T_{ок} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,год}}. \quad (23)$$

Полученное значение обеспечивает значительный стимулирующий эффект.

9. Выводы

Особенности технологии производства и передачи электроэнергии требуют активного участия в этом процессе потребителей, что обеспечивается использованием стимулирующих тарифов, технического регламента и правовых методов воздействия. Стимулирующие тарифы широко применяются в мировой практике. Примером служит двухставочный тариф и тариф, дифференцированный по зонам суток, применяемые давно и успешно.

К сожалению, в РФ базовый тариф на электроэнергию для потребителей является стимулирующим только для режима потребления активной мощности. Режим потребления реактивной мощности этим тарифом не управляется. Для расширения функциональных возможностей базового тарифа, в части управления режимом потребления реактивной мощности, предлагается его дифференцирование методом компенсационной составляющей.

Получена модель дифференцированного тарифа, обладающая стимулирующим эффектом для потребителей как в части режима потребления активной мощности, так и в части реактивной мощности. Она основана на разложении базового тарифа методом компенсационной составляющей, по этой причине не требует изменений в действующую систему тарифообразования в РФ. Для использования модели требуется только дополнение системы тарифообразования новыми документами, связанными с расчетами и использованием стимулирующей части тарифа, а также его компенсационной составляющей.

Предложена методика расчета стимулирующей части тарифа, включающая в себя расчет устанавливаемого тарифа на потребляемую реактивную энергию, обеспечивающего доходность инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (договор № 18-48-730025/18 от 11.06. 2018 г.)

© Кузнецов А.В., 2021

© Ребровская Д.А., 2021

© Чикин В.В., 2021

Поступила в редакцию 03.03.2021

Received 03.03.2021

Библиографический список

- [1] Кузнецов А.В., Магазинник Л.Т. Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения потребителей. Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 144 с.
- [2] О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 // СПС Консультант Плюс. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034> (дата обращения 01.02.2021).
- [3] Воротников В.Э., Жабин К.В., Колибаба В.И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5 (1066). С. 8-19.
- [4] Бартоломей П.И., Паздерин А.А., Паздерин А.В. Направления совершенствования системы оплаты услуг на передачу электроэнергии с учетом международного опыта // Электроэнергия. Передача и Распределение, 2019. № 5 (56). С. 66-71.

- [5] Паздерин А.В., Шевелев И.В., Паздерин А.А., Морозенко Н.А. Надбавки и скидки к тарифам на передачу электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №5 (50). С. 38-43.
- [6] Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии // Промышленная энергетика. 1998. № 10. С. 43-52.
- [7] О правомерности применений положений Инструкции о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию, утвержденной Госкомцен и Минтопэнерго России 30 ноября 1993 г. (№ 01-17/1443-11, ВК-7539). Информационный бюллетень Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации, 2000, 13 июня. № 11.
- [8] Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 (ред. от 02.03.2021) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/ (дата обращения 02.03.2021).
- [9] Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения). Приказ ФСТ России от 31.08.2010 №219-э/6 (ред. от 31.08.2010). [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165067> (дата обращения 02.03.2021).
- [10] Воротицкий В.Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Энергосовет. 2017. №1 (47). С. 44-53.
- [11] Кузнецов А.В., Аргентова И.В. Правовые аспекты применения повышающих коэффициентов к тарифам за потребление реактивной энергии // Промышленная энергетика. 2013. № 3. С. 17-20.
- [12] Кузнецов А.В., Чикин В.В., Ребровская Д.А. Модель формирования стимулирующего тарифа для управления потоками реактивной мощности и качеством электроэнергии // Электроэнергия. Передача и Распределение. 2021. №1 (64). С. 16-22.

- [13] Кузнецов А.В., Ребровская Д.А. Уточнение методики оценки финансовой эффективности установки компенсирующих устройств в сети потребителя // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2017. № (79). С. 51-56.

References

- [1] A.V. Kuznetsov and L.T. Magazinnik, *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya ustrojstv upravleniya peredachej elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya potrebitelej* [Increasing of the efficiency of the electric energy transfer control devices in the systems of the consumers' electric supply]. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2013 (in Russian).
- [2] “O Poryadke rascheta znachenij sootnosheniya potrebleniya aktivnoj i reaktivnoj moshchnosti dlya otdel'nyh energoprimayushchih ustrojstv (grupp energoprimayushchih ustrojstv) potrebitelej elektricheskoy energii [About the procedure for calculating the ratio of the consumption of active and reactive power for individual energy receivers (groups of energy receivers) of consumers of electric energy]”. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of June 23, 2015 N 380. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034> [Accessed: Feb. 1, 2021] (in Russian).
- [3] V.E. Vorotnitskii, K.V. Zhabin and V.I. Kolibaba, “Comparative analysis of reactive power control in the electric power markets of foreign countries and Russia”, *Electrical Stations*, no. 5 (1066), pp. 8-19, 2020.
- [4] P.I. Bartolomej, A.A. Pazderin and A.V. Pazderin, “Directions of improving the electric energy transmission tariff system taking into account international experience”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 5 (56), pp. 66-71, 2019.
- [5] A.V. Pazderin, I.V. Shevelev, A.A. Pazderin, N.A. Morozenko, “Surcharges and discounts on electricity transmission tariffs”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 5 (50), pp. 38-43, 2018.
- [6] “Pravila primeneniya skidok i nadbavok k tarifam na elektricheskuyu energiyu za potreblenie i generaciyu reaktivnoj energii [Rules for the application of discounts and surcharges to tariffs for electric energy for the consumption and generation of reactive energy]”, *Industrial Power Engineering*, no. 10, pp. 43-52, 1998 (in Russian).
- [7] “O pravomernosti primenenij polozhenij Instrukcii o poryadke raschetov za elektricheskuyu i teplovuyu energiyu, utverzhdennoj Goskomcen i Mintopenergo Rossii 30 Noyabrya 1993 g. (N 01-17/1443-11, VK-7539) [On the legality of the application of the provisions of the Instruction on the procedure for payments for electricity and heat, approved by the State Committee for Prices and the Ministry of Fuel and Energy of Russia on November 30, 1993 (No. 01-17/1443-11, VK-7539)]”. Information bulletin of the Federal Energy Commission of the Russian Federation on June 13, 2000 N 11 (in Russian).
- [8] “Ob utverzhdenii Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po peredache elektricheskoy energii i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po operativno-dispatcherskomu upravleniyu v elektroenergetike i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam administratora torgovoj sistemy optovogo rynka i okazaniya etih uslug i Pravil tekhnologicheskogo prisoedineniya energoprimayushchih ustrojstv potrebitelej elektricheskoy energii, ob”ektov

- po proizvodstvu elektricheskoy energii, a takzhe ob"ektov elektrossetevogo hozyajstva, prinadlezhashchih setevym organizatsiyam i inym licam, k elektricheskim setyam [On approval of the Rules for non-discriminatory access to services for the transmission of electrical energy and the provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to services for operational dispatch management in the power industry and the provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to the services of the administrator of the wholesale market trading system and the provision of these services and the Rules for technological connection of power receivers of electrical energy consumers, facilities for the production of electrical energy, as well as power grid facilities belonging to grid organizations and other persons to power grids]". Resolution of the Government of the Russian Federation of December 27, 2004 N 861 (revised on March 2, 2021). [Online]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/ [Accessed: March 2, 2021] (in Russian).
- [9] "Ob utverzhdenii Metodicheskikh ukazaniy po raschetu povyshayushchih (ponizhayushchih) koeffitsientov k tarifam na uslugi po peredache elektricheskoy energii v zavisimosti ot sootnosheniya potrebleniya aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti dlya otdel'nykh energoprinyimayushchih ustrojstv (grupp energoprinyimayushchih ustrojstv) potrebitelej elektricheskoy energii, primenyaemykh dlya opredeleniya obyazatel'stv storon po dogovoram ob okazanii uslug po peredache elektricheskoy energii po edinoj nacional'noj (obshcherossijskoj) elektricheskoy seti (dogovoram energosnabzheniya) [On approval of the methodological guidelines for the calculation of increasing (reducing) ratios to tariffs for electric power transmission services depending on the ratio of active and reactive power consumption for individual power receivers (groups of power receivers) of consumers of electrical energy used to determine the obligations of the parties under contracts for the provision of services for the transmission of electrical energy through the unified national (all-Russian) electrical network (power supply contracts)]". Order of the Federal Tariff Service of Russia on August 31, 2010 N 219-e/6 (revised on August 31, 2010). [Online]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165067> [Accessed: March 2, 2021] (in Russian).
- [10] V.E. Vorotnitsky, "Energeticheskaya effektivnost' i kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyah. Problemy i puti resheniya [Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Problems and solutions]", *Energosovet [Energy Council]*, no. 1 (47), pp. 44-53, 2017 (in Russian).
- [11] A.V. Kuznetsov and I.V. Argentova, "Pravovye aspekty primeneniya povyshayushchih koeffitsientov k tarifam za potreblenie reaktivnoy energii [Legal aspects of the application of increasing coefficients to tariffs for the consumption of reactive energy]", *Industrial Power Engineering*, no. 3, pp. 17-20, 2013 (in Russian).
- [12] A.V. Kuznetsov, V.V. Chikin, D.A. Rebrovskaya, "Incentive tariff formation model for reactive power flows and electricity quality management", *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 1 (64), pp. 16-22, 2021.
- [13] A.V. Kuznetsov and D.A. Rebrovskaya, "Specification of the methodology of estimation of financial efficiency of installation of compensator devices in the consumer network", *Journal of Ulyanovsk State Technical University*, no. 79, pp. 51-56, 2017.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Кузнецов Анатолий Викторович, доктор технических наук, профессор Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

Anatoliy V. Kuznetsov, D. Sci. (Eng.), professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

Ребровская Диана Андреевна, старший преподаватель Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

Diana A. Rebrovskaya, senior lecturer of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

Чикин Владислав Владимирович, аспирант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

Vladislav V. Chikin, postgraduate student of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_53

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

А.Ю. Смирнов

АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»
Нижний Новгород, Россия
a_yu_smirnov@mail.ru

Е.Н. Александрова

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
aleksandrovaen1973@gmail.com

В.В. Исакичев

АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова»
Нижний Новгород, Россия
toe@nntu.ru

Описывается цифровая модель магнитного поля в области паза индукторной машины, примененная для определения обобщенных кривых, характеризующих убыль энергии в воздушном зазоре. Причиной убыли энергии является уменьшение его магнитной проводимости, используемое при расчете электромагнитного момента. Усовершенствована методика расчета индукторных двигателей с развитыми зубчатыми структурами на роторе и статоре, дополненная нелинейным расчетом фрагментарной модели магнитной цепи. Данный расчет выполняется графоаналитическим методом, до и после перемещения ротора из положения максимальной магнитной проводимости воздушного зазора на половину зубцового деления по отношению к зубцам на полюсном наконечнике статора.

Размагничивание ферромагнитных участков магнитной цепи является критерием правильности выбора геометрических параметров зубцовой зоны и электромагнитных нагрузок. Оно устанавливается расчетом на нелинейной модели, после поворота ротора на половину зубцового деления из соосного положения. Полученные графические характеристики выявили отсутствие существенной зависимости между уровнем проводимости зазора под пазом и его формой паза со стороны его дна.

Ключевые слова: индукторная машина, синхронный двигатель зубцовая зона, статор, ротор, электромагнитный момент, метод конечных элементов.

Для цитирования: Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Исакичев В.В. Уточнение параметров магнитного поля в области зубцовой зоны индукторной машины // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 53-63. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_53

REFINING OF MAGNETIC FIELD PARAMETERS IN TOOTH ZONE OF INDUCTOR MACHINE

A.Yu. Smirnov

JSC “Afrikantov OKBM”
Nizhny Novgorod, Russia
a_yu_smirnov@mail.ru

E.N. Aleksandrova

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
aleksandrovaen1973@gmail.com

V.V. Isakichev

JSC “Afrikantov OKBM”
Nizhny Novgorod, Russia
toe@nntu.ru

Abstract. A digital model of the magnetic field in the groove area of an inductor machine is described. The model is used to determine generalized curves that characterize the energy loss in the air gap. The reason for the loss of energy is the decrease in its magnetic conductivity, which are used in the calculation of the electromagnetic moment.

The method of calculation of inductor motors with developed gear structures on the rotor and stator is improved. The method is supplemented by a nonlinear calculation of the fragmentary model of the magnetic circuit. The calculation is performed by the graphoanalytic method, before and after moving the rotor from the position of the maximum magnetic conductivity of the air gap by half the tooth division with respect to the teeth on the pole tip of the stator.

It is noted that the demagnetization of the ferromagnetic sections of the magnetic circuit is a criterion for the correct choice of the geometric parameters of the tooth zone and electromagnetic loads. Demagnetization is established by calculation on a nonlinear model, after turning the rotor by half of the tooth division from the coaxial position.

The obtained graphic characteristics revealed the absence of a significant relationship between the level of conductivity of the gap under the groove and its shape of the groove on the side of its bottom.

Keywords: inductor machine, synchronous motor, tooth zone, stator, rotor, electromagnetic torque, finite element method.

For citation: A.Yu. Smirnov, E.N. Aleksandrova and V.V. Isakichev, “Refining of magnetic field parameters in tooth zone of inductor machine”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 53-63, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_53

I. Введение

При изменении углового положения ротора бесконтактной синхронной машины индукторного типа поле под зубцами полюсов статора периодически изменяется: от максимального уровня, при котором имеет место совпадение осей зубцов статора и ротора, до минимального уровня, при совпадении осей зубцов статора с осями пазов на роторе. Перепадом магнитного потока и до, и после поворота ротора на половину зубцового деления обусловлена способность индукторной машины развивать вращающий электромагнитный момент. При этом момент машины и ее габариты зависят исключительно от переменной составляющей поля и ее индукции B_δ , тогда как постоянная составляющая потока в зазоре в преобразовании энергии не участвует. Она не зависит от положения ротора, дополнительно намагничивает машину и по своему действию относится к потоку рассеяния. Для уточнения доли этого потока в общем потоке в зазоре под гребенчатыми зубцовыми зонами статора и ее учета при проектировании проведены расчетные исследования на модели фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя.

II. Описание модели

Модель предназначена для воспроизведения поля ротора при минимальной проводимости воздушного зазора. Она представлена участками зубцовых зон статора и ротора на протяжении половины зубцового деления, с совпадающими осями паза одного магнитопровода и зубца другого магнитопровода, 1 и 2, и участком воздушного зазора δ между ними (рис. 1). Участки магнитной цепи статора и ротора замкнуты между собой внешним магнитопроводом 3, отделенным линией MN, в пазу которого, на достаточно удаленном расстоянии от его стенок, существенно превышающем зазор δ , расположена катушечная сторона 4 обмотки возбуждения, которая воспроизводит МДС магнитов ротора.

Вследствие значительного магнитного сопротивления пазовых участков зубцовой зоны, ферромагнитные участки магнитной цепи модели остаются ненасыщенными. Поэтому их свойства представлены постоянной магнитной проницаемостью μ , которая определяется наклоном начального участка кривой намагничивания, она принимается равной $10000\mu_0$. Ширина зубцов b_Z модели зависит от длины зубцового деления t_Z и задается в методиках проектирования [1, 2] в соответствии с условием:

$$b_z = \left(\frac{t_z}{2} - 2 \cdot \delta \right), \quad (1)$$

а высота их прямоугольных участков (длина отрезка РМ на рис. 1):

$$h_{np} = 0,6 \cdot (t_z - b_z). \quad (2)$$

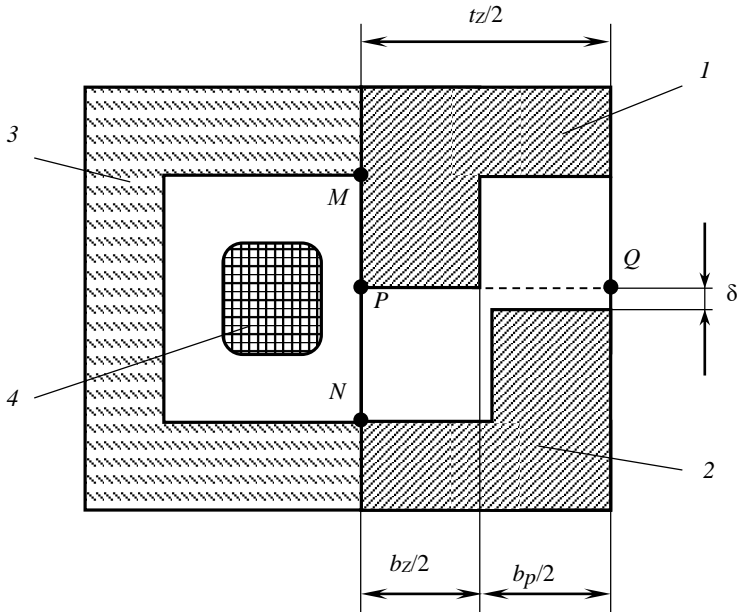


Рис. 1. Модель фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя

Fig. 1. Model of a fragment of the toothed zone of an inductor motor

III. Задача и метод исследований

Задача и метод исследований заключались в точном расчете полей значимости потока, полученного на описанной фрагментарной модели двигателя. Для этого модель рассчитывалась посредством МКЭ относительно удельного, на единицу осевой длины, магнитного потока, пересекающего воздушный зазор по линии PQ модели при совпадении осей зубцов одного магнитопровода с осями пазов противоположного магнитопровода. В этом положении определялась минимальная магнитная проводимость воздушного зазора $\Lambda_{\delta\min}$:

$$\Lambda_{\delta\min} = \frac{\Phi_{PQ}}{F_{\text{кс}}} \quad [\text{Гн/М}], \quad (3)$$

с использованием МДС катушечной стороны $F_{\text{кс}}$ модели, заданной ее площадью и приложенной плотностью тока. Сеточная модель исследуемой области представлена на рис. 2.

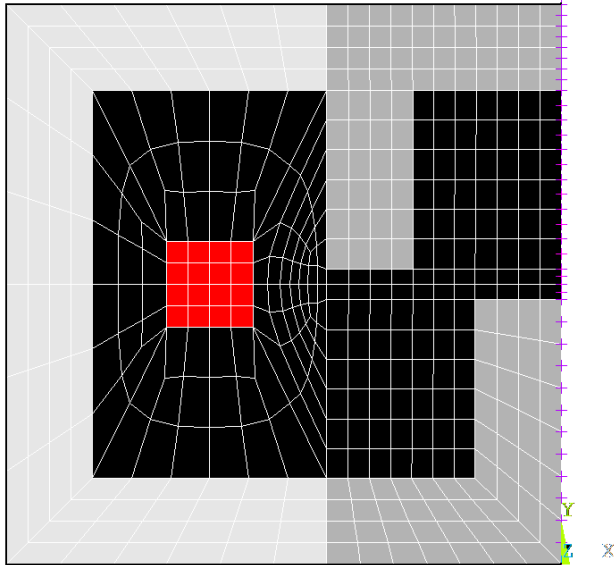


Рис. 2. Сеточная модель зубцовой зоны с прямыми пазами

Fig. 2. Mesh model of the toothed zone with straight slots

Определение доли постоянной составляющей в общей проводимости воздушного зазора осуществлялось путем сравнения значения, найденного по (3) с проводимостью воздушного зазора на протяжении половины зубцового деления при максимальном потоке:

$$\Lambda_{\delta\max} = \frac{\mu_0 \cdot (b_z + 2 \cdot \delta)}{2 \cdot \delta}, \quad (4)$$

и подсчета уменьшающего коэффициента, который входит сомножителем в расчетную формулу для минимального значения индуктивности фазы:

$$k_\Lambda = \frac{\Lambda_{\delta\min}}{\Lambda_{\delta\max} + \Lambda_{\delta\min}}. \quad (5)$$

В силу нечетной симметрии зубцовой зоны в рассматриваемом положении, поток фиксировался только под правой, не искаженной влиянием внешнего магнитопровода, половиной модели (рис. 1), а затем удваивался. Силовые линии магнитного потока рассчитанного поля представлены на рис. 3.

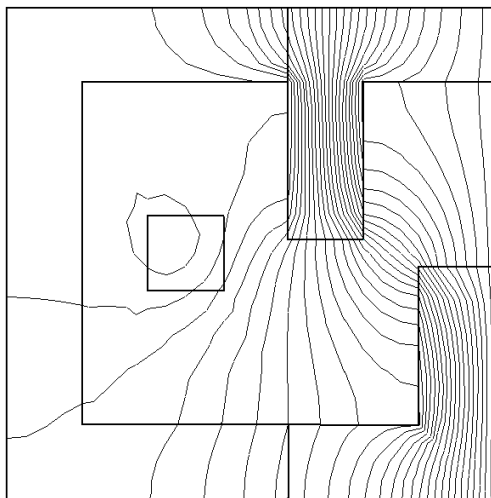


Рис. 3. Распределение индукции в модели зубцовой зоны индукторного двигателя

Fig. 3. Distribution of induction in the model of the toothed zone of the inductor motor

Результаты определения постоянной составляющей магнитной проводимости зубчатого зазора k_{Δ} методом конечных элементов при различной относительной, по отношению к зазору, длине зубцового деления t_z/δ представлены на рис. 4 (треугольный маркер). Для уточнения характеристик зубцовых зон со скругленными пазами составлена аналогичная фрагментарная модель (рис. 5). Она представлена ключевыми точками, используемыми затем для построения расчетных областей и сетки.

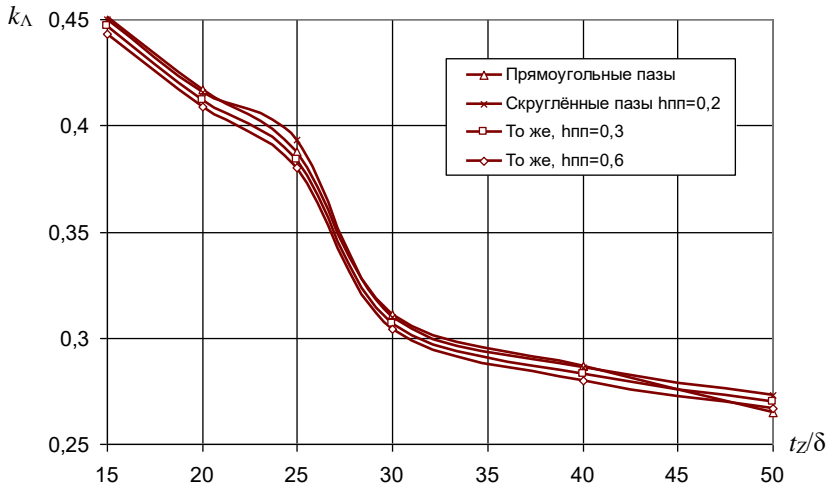


Рис. 4. Значения коэффициента уменьшения магнитной проводимости зазора под пазом k_{Δ}

Fig. 4. Values of the coefficient of reduction of the magnetic conductivity of the gap under the groove k_{Δ}

Модель позволяет воспроизводить поле в области скругленных пазов с различной длиной прямоугольной части $h_{пп}$. Остановимся на следующих вариантах формы пазов гребенчатых зубцовых зон со скругленными пазами:

- 1) полуцилиндрические пазы с минимальными прямоугольными границами, $h_{пп} \approx 0$;
- 2) с укороченной по высоте зубцовой зоной, за счет уменьшенной в два раза протяженности прямоугольных границ $h_{пп} = 0,3 b_p$;
- 3) с прямоугольными границами протяженностью (высотой) [3]:

$$h_{пп} = 0,6 \cdot (1 - k_z) \cdot t_z = 0,36 \cdot t_z; \quad (6)$$

– полноразмерная по высоте зубцовая зона, рис. 5.

В расчетную модель входят также области, представляющие внешний магнитопровод и катушечную сторону обмотки возбуждения, такие же, как и для рассмотренной выше модели с прямыми пазами. Задача расчета – минимизация высоты паза, представленной суммой $h_{пп} + b_p / 2$ при сохранении приемлемых соотношений постоянной составляющей проводимости зазора k_{Δ} , не превышающей значения этого коэффициента для прямых пазов.

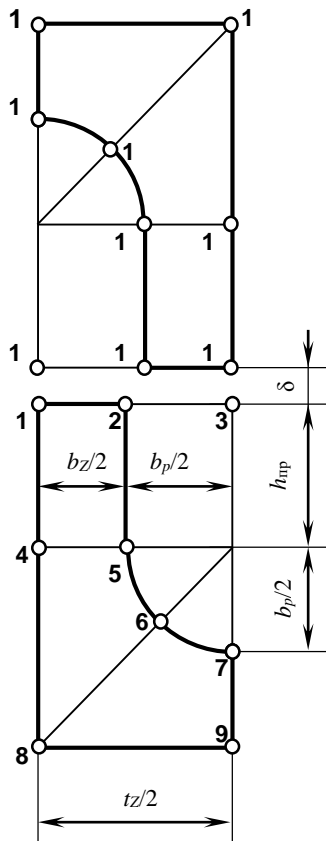


Рис. 5. Обозначение размеров и нумерация ключевых точек фрагмента зубцовой зоны индукторного двигателя со скруглёнными пазами

Fig. 5. Designation of dimensions and numbering of key points of a fragment of the toothed zone of an inductor motor with rounded slots

Результаты расчета параметров зубцовой зоны со скругленными пазами добавлены в рис. 4. С учетом найденного коэффициента определение электромагнитного момента двигателя с безобмоточным зубчатым ротором существенно упрощается. Для этого достаточно один раз рассчитать магнитный поток одной ее фазы в положении максимальной проводимости зазора, т.е., при соосном положении зубцов с катушками этой фазы и зубцов

ротора. Используя графоаналитические методы, можно найти максимальный магнитный поток в зазоре Φ_δ от действия МДС катушек этой фазы [4], после чего, средний, на полупериоде изменения, электромагнитный момент отыскивается из простого выражения:

$$M_{\text{эм}} = \frac{Z}{2\pi} \cdot \Phi_\delta^2 \cdot \frac{1 - k_\Lambda}{k_\Lambda \cdot \Lambda_{\delta\text{max}}}. \quad (7)$$

Из среднего значения можно выделить первую гармонику момента для одной фазы двигателя:

$$M_1 = \frac{4 \cdot M_{\text{ср}}}{\pi} = 1,273 \cdot M_{\text{ср}}, \quad (8)$$

и электромагнитный момент машины в целом:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} \cdot M_1, \quad (9)$$

где m – число фаз.

Из сопоставления значений коэффициента уменьшения проводимости зазора, рассчитанного при одной и той же ширине открытия паза у зазора (значение b_p), но при различной кривизне у его дна, делается вывод о том, что она мало влияет на магнитную проводимость зазора. Можно заключить, что при умеренном насыщении предпочтительными являются пазы прямоугольной формы как имеющие меньший радиальный размер зубцовых зон, более технологичных и позволяющих снизить момент инерции ротора.

IV. Заключение

Предварительный расчет поля в области зубцовой зоны индукторной машины методом конечных элементов позволяет повысить точность определения электромагнитного момента машины и вдвое сократить трудоемкость вычислений. Он выполняется один раз для широкого диапазона значений относительной, по отношению к зазору, ширины зубцов и пазов статора и ротора.

© Смирнов А.Ю., 2021

© Александрова Е.Н., 2021

© Исакичев В.В., 2021

Поступила в редакцию 22.03.2021

Received 22.03.2021

Библиографический список

- [1] Смирнов А.Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. М.: ИНФРА-М, 2021. – 200 с.
- [2] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс). М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [3] Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.И., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
- [4] Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Зимин А.Ю. Уточнение моделей расчёта момента при проектировании индукторных двигателей // Электричество. 2020. № 11. С. 54-59. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59.

References

- [1] A.Yu. Smirnov, *Elektroprivod s beskontaktnymi sinhronnymi dvigatelyami [Electric drive with contactless synchronous motors]*. Moscow: INFRA-M, 2021.
- [2] A.Yu. Smirnov, *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyj analiz (special'nyj kurs) [Inductor machines. Design and computational analysis (special course)]*. Moscow: Forum, 2015.
- [3] A.V. Ivanov-Smolensky, Yu.I. Abramkin, A.I. Vlasov and V.A. Kuznetsov, *Universal'nyj metod raschyota elektromagnitnyh processov v elektricheskikh mashinah [Universal method for calculating electromagnetic processes in electric machines]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986.
- [4] A.Yu. Smirnov, E.N. Alexandrova and A.Yu. Zimin, “Refining the torque calculation models in designing salient-pole inductor motors”, *Electricity*, no. 11, pp. 54-59, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Смирнов Александр Юрьевич, доктор технических наук, ведущий инженер-конструктор АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Александрова Екатерина Николаевна, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Исакичев Владимир Владимирович, инженер-конструктор АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Alexander Yu. Smirnov, D. Sci. (Eng.), chief design engineer of the JSC “Afrikantov OKBM”, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Ekaterina N. Alexandrova, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Isakichev V. Vladimirovich, design engineer of the JSC “Afrikantov OKBM”, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ ЭНЕРГОСНАБЖАЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

С.Н. Юртаев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
iurtaev@nntu.ru

Т.О. Кофорова

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
tatianakoforova@mail.ru

Анализируется необходимость комплексного подхода при разработке мер по повышению качества электроснабжения населенных пунктов, а также важность экономического обоснования принимаемых решений по модернизации электрических сетей. Исследованы наиболее распространенные подходы к оценке эффективности инвестиционных проектов. Внесено предложение по использованию в электроснабжении нового подхода к обоснованию выбора вариантов капитальных вложений на основе затрат с учетом упущенной выгоды. Предложены методы определения отдельных их элементов. Проведены расчеты с использованием предлагаемого механизма обоснования выбора наиболее экономически эффективного варианта проекта. Результаты расчетов подтвердили более глубокую обоснованность выбора и практическую пригодность предлагаемого алгоритма действий.

Ключевые слова: модернизация сетей электроснабжения, повышение качества электроснабжения, полные экономические затраты, потери электрической энергии, эффективность инвестирования проектов, энергосберегающие мероприятия.

Для цитирования: Юртаев С.Н., Кофорова Т.О. Эффективность капитальных вложений энергоснабжающих организаций // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 64-73. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_64

EFFICIENCY OF CAPITAL INVESTMENTS OF ENERGY SUPPLYING ORGANIZATIONS

S.N. Iurtaev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
iurtaev@nntu.ru

T.O. Koforova

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
tatianakoforova@mail.ru

Abstract. The need for an integrated approach in the development of measures to improve the quality of power supply to settlements is noted, as well as the importance of economic justification of decisions to modernize electrical networks. The most common approaches to assessing the effectiveness of investment projects are analyzed. A proposal was made for the use of a new approach in power supply to justify the choice of capital investment options based on costs, taking into account lost profits. Methods for determining their individual elements are proposed. Calculations have been carried out using the proposed mechanism of justifying the choice of the most cost-effective variant of the project. The calculation results confirmed the deeper validity of the choice and the practical suitability of the proposed action algorithm.

Keywords: efficiency of project investment, electricity losses, full economic costs, improving the quality of power supply, modernization of power supply networks.

For citation: S.N. Iurtaev and T.O. Koforova, "Efficiency of capital investments of energy supplying organizations", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 64-73, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_64

I. Введение

Мероприятия по модернизации электрических сетей, снижению потерь электрической энергии при ее передаче по сетям, решению организационных и других вопросов, осуществляемые в ходе разработки мер по повышению качества электроснабжения удаленных потребителей, не могут ориентироваться только на удовлетворение требований потребителей электроэнергии [1].

В условиях ограниченности материальных и финансовых ресурсов нельзя не учитывать изменение экономических показателей электроснабжающих организаций до и после проведения мероприятий [2].

II. Цель и задачи исследования

Для оценки эффективности инвестирования проектов широко применяется метод определения сроков окупаемости капитальных вложений, один из самых простых и распространенных в мировой практике. Срок окупаемости $C_{ок}$ определяется отношением объема капитальных вложений к среднегодовой сумме прибыли [3, с. 216]:

$$C_{ок} = \frac{K}{\Pi}, \quad (1)$$

где K – объем капитальных вложений, руб.; Π – среднегодовая сумма прибыли, руб.

Показатель, обратный сроку окупаемости – коэффициент эффективности. Он показывает, какая доля капитальных затрат ежегодно окупается за счет прибыли. Для оценки целесообразности инвестирования проектные показатели срока окупаемости и коэффициента эффективности капитальных вложений сравнивают с их нормативными значениями, которые могут дифференцироваться по отраслям экономики.

В ходе оперативного решения вопросов улучшения качества электроэнергии часто приходится применять упрощенный подход, делать выбор вида материалов для линий электропередач.

Разные материалы имеют различные технико-экономические характеристики, разный срок службы (Π) и, соответственно, разную стоимость. Учитывая тот факт, что объем монтажных и прочих работ существенно не меняется при использовании различных материалов, изменение себестоимости передачи электроэнергии в расчете на год (ΔC) будет определяться из сравнения годовых сумм амортизации сравниваемых вариантов линий электропередач [4]:

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{K_{м2}}{\Pi_2} - \frac{K_{м1}}{\Pi_1}, \quad (2)$$

где C_2 и C_1 – себестоимость передачи электроэнергии по линиям электропередач из двух разных видов материалов, соответственно, руб.; $K_{м2}$ и $K_{м1}$ – первоначальная стоимость линий электропередач из двух разных видов материалов, соответственно, руб.; Π_2 и Π_1 – сроки службы линий электропередач из двух разных видов материалов, соответственно, лет.

Экспресс-анализ эффективности различных вариантов модернизации сетей электроснабжения должен производиться с учетом нормативной эффективности капвложений в электроснабжении.

Абстрагируясь от прочих капитальных затрат, кроме затрат на материалы для линий электропередач, т.е., принимая во внимание, что разница в сумме капвложений определяется, главным образом, стоимостью матери-

алов, для экспресс-анализа эффективности различных вариантов модернизации сетей можно использовать известную формулу годового экономического эффекта [5, с. 246]:

$$\mathcal{E}_r = (C_1 + E_n \cdot K_{m1}) - (C_2 + E_n \cdot K_{m2}), \quad (3)$$

где \mathcal{E}_r – годовой экономический эффект от применения первого варианта материала по сравнению со вторым, руб.; C_1 и C_2 – себестоимость годового объема передачи электроэнергии при использовании линий электропередач из двух разных материалов, соответственно, руб.; E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капиталовложений в электроснабжении; K_{m1} и K_{m2} – капиталовложения в линии электропередач из двух разных видов материалов, соответственно, руб.

Проблема состоит в том, что используемые методы оценки эффективности капитальных вложений учитывают только «явные» инвестиции, реальные затраты, и не учитывают скрытые потери, которые выражаются в суммах недополученного дохода. Возникает необходимость разработки механизмов оптимизации выбора инвестиционных проектов. Для достижения поставленной цели потребовалась решить следующие задачи:

- изучить методы оптимизации выбора вариантов инвестиционных проектов, применяемые в электроснабжении, и новые научные подходы к решению этой проблемы;
- предложить алгоритм обоснования выбора вариантов инвестиционных проектов на основе затрат с учетом упущенной выгоды.

III. Описание предлагаемых методов решения поставленных задач

Если речь идет о масштабных работах, требующих значительных объемов финансирования со стороны инвестора, представляется целесообразным вопрос о выборе вариантов инвестиций решать на основе определения полных экономических затрат $Z_{пз}$ [6, с. 109], в которых бы отражались как текущие затраты на передачу электроэнергии, так и упущенная выгода, упущенные возможности инвестора получить текущий доход, связанные с вложением средств в данное производство («замораживанием» средств на несколько лет) и отказом от использования их в других сферах, приносящих текущий доход.

Упущенная выгода – это уменьшение текущих экономических выгод, доход, не полученный в текущем году. Потеря дохода – это затраты (т.н. «временные»). Полные экономические затраты предприятия определяются как сумма текущих затрат на производство и реализацию продукции и упущенной выгоды [6, с. 109]:

$$Z_{пз} = Z_{тек.} + УВ, \quad (4)$$

где $Z_{\text{тек}}$ – текущие затраты на производство и реализацию продукции, руб.; УВ – упущенная выгода инвестора, руб.

Упущенная выгода инвестора определяется по формуле [6, с. 109]:

$$УВ = \frac{(S_{\text{ср.ост.}} + \text{ТМЗ} + \text{ДЗ} + \text{ДС}) \cdot P_{\text{акт.}}}{100\%}, \quad (5)$$

где $S_{\text{ср.ост.}}$ – среднегодовая остаточная стоимость внеоборотных активов, руб.; ТМЗ – среднегодовая стоимость товарно-материальных запасов, руб.; ДЗ – среднегодовая сумма чистой дебиторской задолженности, руб.; ДС – среднегодовая сумма текущих остатков денежных средств, руб.; $P_{\text{акт.}}$ – рентабельность активов, %.

В качестве примера приведен расчет затрат с учетом упущенной выгоды на действующем энергопредприятии, осуществляющем масштабные работы по модернизации сетей электроснабжения. Текущие затраты на передачу электроэнергии по сравниваемым вариантам модернизации и стоимость внеоборотных активов определяются по данным проектных разработок. Стоимость товарно-материальных ценностей для каждого варианта проекта принимается в размере норматива оборотных средств, рассчитываемого по каждому их элементу по существующим апробированным методикам [7].

Дебиторская задолженность – это сумма, причитающаяся предприятию со стороны других юридических и физических лиц (дебиторов). Дебиторами могут быть покупатели, работники предприятия, получившие денежные средства под отчет на приобретение товарно-материальных ценностей, командировочные расходы и другие цели. Ими могут вытсупать и поставщики, если сумма перечисленной им предоплаты за товары и услуги превышает сумму, причитающуюся к оплате по счету. Таким образом, дебиторская задолженность – сумма долгов предприятию, без образования которой невозможна нормальная деятельность. Эти средства принадлежат предприятию, но временно находятся в распоряжении других юридических и физических лиц. Дебиторская задолженность относится к ненормируемым оборотным средствам предприятия. Алгоритма ее нормирования не существует, нормативы по дебиторской задолженности не определяются, в отличие от товарно-материальных ценностей. Однако для определения ее размеров могут быть использованы различные статистические методы, один из которых использован в рассматриваемом ниже примере.

Кредиторская задолженность – это долги предприятия перед поставщиками, налоговыми органами, работниками предприятия и другими контрагентами, юридическими и физическими лицами. Если дебиторская задолженность требует наличия дополнительных финансовых ресурсов

предприятия для осуществления непрерывной деятельности, то кредиторская задолженность – дополнительный источник финансирования расходов предприятия.

Сопоставляя дебиторскую и кредиторскую задолженность, можно выявить чистую дебиторскую задолженность (превышение дебиторской задолженности над кредиторской) или чистую кредиторскую задолженность (превышение кредиторской задолженности над дебиторской). Если результатом анализа дебиторской и кредиторской задолженности окажется чистая дебиторская задолженность, то инвестору, действующему предприятию, для обеспечения нормальной непрерывной деятельности необходимо вложить эту сумму в хозяйственный оборот.

Денежные средства также относятся к ненормируемым оборотным средствам предприятия, нормативы по ним не определяются. Однако нормальная деятельность предприятия невозможна без наличия свободного остатка денежных средств. Поэтому инвестору также необходимо предусмотреть вложение в оборот дополнительных финансовых ресурсов для этих целей. Для расчета сумм чистой дебиторской задолженности и остатка свободных денежных средств представляется возможным применить один из статистических методов [8], а именно: определить по данным финансовой отчетности предприятия процентное отношение указанных элементов оборотных средств к текущим затратам на передачу электроэнергии в целом по предприятию в предыдущем отчетном периоде и экстраполировать это отношение на проектные расчеты.

Расчет затрат с учетом упущенной выгоды по двум вариантам инвестиций приведен в табл. 1. Сведения по идентификации предприятия, а также технические параметры вариантов проекта не приводятся, так как составляют коммерческую тайну. Они не имеют принципиального значения для оценки эффективности капитальных вложений.

Порядок исчисления затрат с учетом упущенной выгоды по вариантам инвестиций приведен ниже.

Вариант 1 (в тыс. руб.):

$$УВ = \frac{(111418 + 45533 - 16327 + 7650) \cdot 12\%}{100\%} = 17793 ;$$
$$З = 932944 + 17793 = 950737 .$$

Вариант 2 (в тыс. руб.):

$$УВ = \frac{(100230 + 46444 - 16597 + 7777) \cdot 12\%}{100\%} = 16542 ;$$
$$З = 948426 + 16542 = 964968 .$$

Таблица 1.
Расчет затрат с учетом упущенной выгоды (тыс. руб.)

Table 1.
Calculation of costs taking into account lost profits

№	Показатели	Преды- дущий год	Вариант №1	Вариант №2
1.	Стоимость внеоборотных активов	735 351*	111 418	100 230
2.	Норматив оборотных средств по товарно-материальным ценностям	-	45 533	46 444
3.	Текущие затраты на передачу электроэнергии по вариантам проекта	-	932 944	948 426
4.	Текущие затраты на передачу электроэнергии в целом по предприятию в предыдущем отчетном периоде	5 611 030 *	-	-
5.	Чистая дебиторская задолженность:			
5.1	(+) превышение среднегодовой дебиторской задолженности над кредиторской;		п.3, гр. 4 п.5.2, гр.3	п.3, гр. 5 п.5.2, гр.3
5.2	(-) превышение среднегодовой кредиторской задолженности над дебиторской	-98 054*	-16 327	-16597
5.2	Процентное отношение к текущим затратам на передачу электроэнергии (п.5.1: п.4), %	1,75	-	-
6.1	Денежные средства: Среднегодовая сумма денежных средств	45 901*	п.3, гр. 4 п.6.2, гр.3 7 650	п.3, гр. 5 п.6.2, гр.3 7 777
6.2	Процентное отношение к текущим затратам на передачу электроэнергии (п.6.1: п.4), %	0,46	-	-
7.	Рентабельность активов, %	12*	12	12
8.	Упущенная выгода (УВ)	-	17 793	16 542
9.	Затраты с учетом упущенной выгоды (З)	-	950 736	964 968

* Показатели, приняты по данным финансовой отчетности предприятия за предыдущий отчетный период

IV. Результаты

Расчеты показали, что экономически более эффективным является первый вариант проекта инвестиций. Апробирование предложенной методики расчета затрат с учетом упущенной выгоды на примере действующего энергоснабжающего предприятия подтверждают практическую применимость методики, относительную простоту расчетов и доступность источников базовой информации.

V. Заключение

Ни в одной из известных авторам работ в расчетах эффективности капитальных вложений не используются затраты с учетом упущенной выгоды. Исследование проблемы показывает, что новый подход к анализу на основе предложенного метода более полно и объективно характеризует эффективность инвестиционной деятельности.

© Юртаев С.Н., 2021

© Кофорова Т.О., 2021

Поступила в редакцию 16.03.2021

Received 16.03.2021

Библиографический список

- [1] Воротницкий В.Э., Заслонов С.В., Калинкина М.А. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. М.: ВНИИЭ, 2006. – 65 с.
- [2] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- [3] Руткаускас Т.К. и др. Экономика организации (предприятия). 2-е изд. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. – 260 с.
- [4] Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
- [5] Экономика предприятия (организации). Н. Новгород: НОО «Профессиональная наука», 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://scipro.ru/conf/enterpricseeconomu.pdf>. (дата обращения 30.12.2020).
- [6] Кофорова Н.М. Контроллинг затрат в системе управления промышленным предприятием. Екатеринбург – Н. Новгород: Изд-во института экономики УрО РАН, 2008. – 179 с.
- [7] Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений. Федеральный закон от 25.02.1999г. №39-ФЗ (ред. от 08.12.2020г.). Российская газета от 4 марта 1999г., №41-42.

- [8] Баранчикова С.Г., Дашкова Т.Е., Ершова И.В., Калинина Н.Е., Клюев А.В., Норкина О.С., Типнер Л.М., Черепанова Е.В., Шабалина В.А. Экономическая эффективность технических решений. Екатеринбург: Изд-во Урал. у-та, 2016. – 140 с.

References

- [1] V.E. Vorotnitsky and S.V. Zaslouov, *Raschet, normirovanie i snizhenie poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam* [Calculation, regulation and reduction of electricity losses during its transmission through electric grids]. Moscow: VNIIE, 2006 (in Russian).
- [2] Yu.S. Zhelezko, *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality. A guide for practical calculations]. Moscow: ENAS, 2009 (in Russian).
- [3] T.K. Rutkauskas, *Ekonomika organizacii (predpriyatiya)* [Organization (enterprise) economics]. 2nd ed. Ekaterinburg: Publishing house of UMC UPI, 2018 (in Russian).
- [4] Yu.S. Zhelezko, *Vybor meropriyatij po snizheniyu poter' elektroenergii v elektricheskikh setyah: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [The choice of measures to reduce electricity losses in electrical networks: a guide for practical calculations]. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [5] *Ekonomika predpriyatiya (organizacii)* [Economy of an enterprise (organization)]. N. Novgorod: NOO "Professional Science", 2018. [Online]: Available at: <http://scipro.ru/conf/enterpricseeconomy.pdf> [Accessed: Dec. 30, 2020] (in Russian).
- [6] N.M. Koforova, *Kontrolling zatrat v sisteme upravleniya promyshlennym predpriyatiem* [Cost Controlling in the Industrial Enterprise Management System]. Ekaterinburg - N. Novgorod: Publishing house of the Institute of Economics, Ural Branch of the RAS, 2008 (in Russian).
- [7] "Ob investicionnoj deyatel'nosti v Rossijskoj Federacii, osushchestvlyаемoj v forme kapital'nyh vlozhenij [On investment activities in the Russian Federation, carried out in the form of capital investments]", Federal Law on Feb. 25, 1999 N 39-FZ (amended on 08.12.2020). Russian newspaper dated March 4, 1999, no. 41-42 (in Russian).
- [8] S.G. Baranchikova, T.E. Dashkova, I.V. Ershova, N.E. Kalinina, A.V. Klyuev, O.S. Norkina, L.M. Tipner, E.V. Cherepanova, V.A. Shabalina, *Ekonomicheskaya effektivnost' tekhnicheskikh reshenij* [Economic efficiency of technical solutions]; ed. I.V. Ershova. Ekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2016 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Юртаев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Sergey N. Iurtaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Кофорова Татьяна Олеговна, бакалавр Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Tatiana O. Koforova, bachelor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.311:621.316.99:628.518

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_74

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 35 кВ

Ю.И. Жарков

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)
Ростов-на-Дону, Россия
asel@rgups.ru

Н.А. Попова

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)
Ростов-на-Дону, Россия
asel@rgups.ru

Е.П. Фигурнов

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)
Ростов-на-Дону, Россия
asel@rgups.ru

Определен круг вопросов, относящихся к безопасности линий электропередачи, которые должны быть учтены при проектировании и строительстве. Описаны основные требования безопасности, даны ссылки на источники их нормирования.

Ключевые слова: безопасные расстояния, железнодорожные нетяговые потребители, заземляющие устройства, промышленные радиопомехи, механическая прочность, линия электропередачи, прочность изоляции, пожарная безопасность, требования безопасности, электромагнитные поля.

Для цитирования: Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Требования безопасности для железнодорожных линий электропередачи напряжением до 35 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 74-82. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_74

SAFETY REQUIREMENTS FOR RAILWAY POWER LINES WITH VOLTAGE UP TO 35 kV

Yu.I. Zharkov

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia
asel@rgups.ru

N.A. Popova

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia
asel@rgups.ru

E.P. Figurnov

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia
asel@rgups.ru

Abstract. The range of questions relating to the safety of electric lines, which should be taken into account during designing and building, is determined. The paper gives the major safety requirements with corresponding links to the sources of their rating.

Keywords: electric line, electromagnetic fields, fire safety, grounding devices, industrial radio disturbances, insulation strength, mechanical strength, railway non-traction consumers, safe distances, safety requirements.

For citation: Yu.I. Zharkov, E.P. Figurnov and N.A. Popova, "Safety requirements for railway power lines with voltage up to 35 kV", *Smart Electrical Engineering*, no. X, pp. 74-82, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_74

В соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза о безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта [1] и Техническим регламентом Таможенного союза о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта [2], под безопасностью линии электропередачи (ЛЭП) следует понимать такое ее состояние, при котором отсутствует риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений.

Для обеспечения безопасности к ЛЭП должны быть предъявлены следующие требования при проектировании и строительстве:

а) соблюдение условий, при которых обеспечиваются:

- безопасное расстояние от элементов составных частей ЛЭП, находящихся под напряжением, до заземленных частей, поверхности земли, настила пешеходных мостов, лестниц, пассажирских платформ и железнодорожных переездов, а также ЛЭП и других инженерных сооружений, не входящих в состав инфраструктуры железнодорожного транспорта;
- значение сопротивления заземляющих устройств, при котором при прикосновении к открытым проводящим частям ЛЭП соблюдаются условия безопасности (напряжение не более допустимого значения при прикосновении к корпусам электрооборудования и другим металлическим конструкциям);
- уровень промышленных радиопомех, создаваемых ЛЭП, не выше допустимого;
- пожарная безопасность;
 - б) использование оборудования, параметры которого обеспечивают:
- электрическую прочность изоляции не ниже допустимого значения;
- превышение температуры токоведущих частей над температурой окружающей среды не выше нормированного значения (безопасный уровень нагрева);
- необходимый уровень защиты от опасного и вредного воздействия электромагнитных полей;
 - в) обеспечение механической прочности элементов ЛЭП при воздействии эксплуатационных нагрузок нормального режима, в расчетных аварийных режимах, монтажных нагрузках.

Трассы ЛЭП должны проходить так, чтобы не загромождать устройства сигнализации, не затруднять движение поездов, не загромождать въезды на станцию и входы в здания. Прокладка ЛЭП на опорах контактной сети, жестких поперечинах, искусственных сооружениях и других конструкциях, заземленных на рельс железнодорожного пути, должна выполняться с соблюдением требований Правил устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог [3], Инструкции по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах [4], а также требований действующих правил и норм для устройств электроснабжения железных дорог.

В целях надежности электроснабжения не следует допускать совместную подвеску на общих опорах воздушных линий напряжением до 1 кВ и свыше 20 кВ, а также взаиморезервирующих воздушных линий. Безопасные расстояния между проводами ЛЭП, от проводов до поверхности земли или водного пространства, до проводов других ЛЭП и линий связи, до других сооружений и конструкций, должны соответствовать установленным в [3, 5]. Это же условие относится к глубине заложения кабелей, расстояниям между ними, между кабелями и другими сооружениями и конструкциями.

ЛЭП напряжением до 1 кВ, получающие электроэнергию от однофазных трансформаторов, следует выполнять как электроустановки типа системы заземления IT в соответствии с [6]. Если ЛЭП напряжением до 1 кВ получает питание от трехфазного трансформатора, для нее следует использовать следующие типы системы заземления [6]:

- а) если ЛЭП подвешена хотя бы на одной опоре, заземленной на рельсовую цепь переменного тока частотой 50 Гц, или пересекает железнодорожные пути, оборудованные такими рельсовыми цепями, или сближается с такими железнодорожными путями на расстояние менее 2 м – систему IT;
- б) если ЛЭП не отвечает ни одному из условий по п. а) – систему TN.

ЛЭП напряжением свыше 1 кВ следует выполнять как электроустановки с изолированной нейтралью. Сопротивления заземляющих устройств ЛЭП, отстоящих от железнодорожных путей на расстояние свыше 5 м, должно соответствовать установленным в [3-5]. Отдельные металлические и железобетонные опоры ЛЭП, отстоящие от железнодорожных путей на расстояние до 5 м, следует заземлять на рельсовую цепь в соответствии с требованиями [4]. При этом опоры ЛЭП напряжением свыше 1 кВ необходимо заземлять на рельсовую цепь посредством группового заземления, либо на самостоятельное заземление.

Самонесущие изолированные провода воздушных линий напряжением до 1кВ и защищенные провода напряжением свыше 1 кВ всех фаз, проложенные вдоль электрифицированной железной дороги, необходимо оборудовать ответвительными зажимами для присоединения заземляющих штанг. Расстояние между каждыми двумя смежными ответвительными зажимами должно соответствовать расстоянию между двумя заземляющими штангами, установленному [7]. Уровень промышленных радиопомех, создаваемых ЛЭП автоблокировки и продольного электроснабжения, проложенным по опорам контактной сети и на самостоятельных опорах не должен превышать норм, установленных в [8]. Для ЛЭП другого назначения эти помехи должны отвечать требованиям [9].

Воздушные и кабельные линии должны отвечать требованиям [10] пожарной безопасности. Кабельные сооружения и конструкции следует выполнять из негорючих материалов. При прокладке в кабельных сооружениях и тоннелях кабели не должны иметь наружных оболочек из горючих материалов. Все они должны пройти проверку на невозгораемость при коротких замыканиях в соответствии с [11]. Прохождения воздушных линий над зданиями и сооружениями, как правило, допускать не следует. В обоснованных случаях можно допустить прохождение этих линий над крышами зданий и сооружений с кровлей из негорючих материалов, имеющих категории Г или Д по пожарной и взрывопожарной опасности и I или II степе-

нюю огнестойкости. Расстояние от проводов до зданий при этом должно отвечать требованиям [9]. В воздушных линиях электропередачи напряжением до 1 кВ рекомендуется применение линейных штыревых фарфоровых изоляторов, а напряжением свыше 1 кВ – подвесных тарельчатых стеклянных и стержневых полимерных, а также штыревых фарфоровых. В районах расселения крупных птиц должны применяться подвесные изоляторы, штыревые изоляторы специальной конструкции, препятствующие посадке на них птиц, или специальные ограждающие устройства аналогичного назначения. Для выполнения требования электрической прочности изоляторы (гирлянды изоляторов) должны иметь действительную длину пути утечки не менее расчетной или значение 50 % разрядной характеристики не менее наименьшего допустимого значения для наибольшего рабочего междуфазного напряжения линии, установленного в нормативной технической документации на соответственный тип изоляторов, с учётом степени загрязнения атмосферы по [3].

Сопротивление изоляции кабельных линий напряжением до 1 кВ должно быть не менее 0,5 МОм. Изоляция кабельных линий напряжением свыше 1 кВ должна быть испытана повышенным напряжением, значение и длительность приложения которого устанавливается нормативной технической документацией в соответствии с видом изоляции и напряжением кабеля. Провода и кабели должны выбираться таким образом, чтобы при протекании тока в заданных режимах их температура не превышала допустимых, установленных стандартами или техническими условиями. Для выполнения этого требования провода и кабели должны подвергаться проверке на нагрев. Допускается производить проверку на нагрев по значению длительно допустимого тока, установленного в [3, 5, 12]. Кроме того, следует проверить провода и кабели в режиме короткого замыкания на термическую безопасность (термическую стойкость) в соответствии с [11].

Высоковольтные ЛЭП являются источником электромагнитных полей, воздействующих на находящихся вблизи людей. Электрическая составляющая электромагнитного поля при напряжениях ЛЭП электроснабжения нетяговых потребителей 35 кВ и ниже сравнительно невелика, опасности не представляет, ее можно не учитывать. Магнитная составляющая этого поля с частотой 50 Гц не должна превышать допустимого уровня, установленного в гигиенических нормативах Роспотребнадзора [13].

Для обеспечения электромагнитной совместимости на ЛЭП, проложенных на опорах контактной сети переменного тока, необходимо осуществлять транспозицию проводов не более чем через 1 км при полном цикле транспозиции 3 км. Если ЛЭП проложена на опорах контактной сети постоянного тока или на самостоятельных опорах, транспозицию допускается осуществлять через каждые 3 км при полном цикле транспозиции 9 км.

При выборе конструкций ЛЭП необходимо обеспечить выполнение требования механической прочности:

- механическое напряжение проводов от действующих нагрузок в нормальном, аварийном и монтажном режимах не должно превышать допустимых значений, установленных [5];
- расчетные усилия в изоляторах и арматуре от действующих нагрузок не должны превышать значений, разрушающих нагрузок, установленных стандартами или техническими условиями на соответствующую продукцию;
- расчетный изгибающий момент от действующих на опору нагрузок в нормальном, аварийном и монтажном режимах не должен превышать нормативных значений, установленных стандартами или техническими условиями для стойки, из которой изготовлена опора.

Воздействующие нагрузки на провода, изоляторы, арматуру и опоры в нормальном, аварийном и монтажном режимах должны учитывать низшую температуру окружающей среды, наибольшую скорость ветра, наибольшую толщину стенки гололеда, значения которых следует принимать в соответствии со строительными нормами и правилами [14, 15] с учетом изменений, приведенных в [5] и нормами проектирования [16].

© Жарков Ю.И., 2021

© Попова Н.А., 2021

© Фигурнов Е.П., 2021

Поступила в редакцию 14.03.2021

Received 14.03.2021

Библиографический список

- [1] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 003/2011. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта. Принят решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
- [2] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 002/2011. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта. Принят решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
- [3] ЦЭ-868. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2002. – 184 с.
- [4] ЦЭ-191. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. М.: 1993. – 68 с.
- [5] Правила устройства электроустановок. Новосибирск: Норматика, 2020. – 462 с.
- [6] ГОСТ Р 50571.1-2009 (МЭК 60364-1:2005). Электроустановки низковольтные. Часть 1. Основные положения, оценка общих характеристик, термины и определения. Введ. 2009-08-26.

- [7] ЦЭ-750. Правила безопасности при эксплуатации контактной сети и устройств электроснабжения автоблокировки железных дорог. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2000. – 80 с.
- [8] ГОСТ 29205-91. Совместимость технических средств электроснабжения. Радиопомехи промышленные от электротранспорта. Нормы и методы испытания. Введ. 1993-01-01.
- [9] ГОСТ 22012-82. Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерения. Введ. 1983-07-01.
- [10] ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Введ. 1992-07-01.
- [11] ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электрического и термического действия тока короткого замыкания. Введ. 2007-07-12.
- [12] ЦЭ-462. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. М.: 1997. – 80 с.
- [13] Гигиенический норматив ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях. Утв. 2007-08-21 № 40. М.: 2008.
- [14] СНиП 23-01-99. Строительные нормы и правила. Строительная климатология. Введ. 2000-01-01.
- [15] СНиП 2.01.07-85 Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. Введ. 1987-01-01.
- [16] СТН ЦЭ 141-99. Нормы проектирования контактной сети. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2001. – 176 с.

References

- [1] O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [On the safety of the railway transport infrastructure]. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 003/2011. Adopted by the decision of the Customs Union Commission dated July 15, 2011 No. 710 (in Russian).
- [2] O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [On the safety of high-speed rail transport]. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 003/2011. Adopted by the decision of the Customs Union Commission dated July 15, 2011 No. 710 (in Russian).
- [3] *CE-868. Pravila ustrojstva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoj seti elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Rules for the construction and technical operation of the contact network of electrified railways]*. Moscow: TRANSIZDAT, 2002 (in Russian).
- [4] *CE-191. Instrukciya po zazemleniyu ustrojstv elektrosnabzheniya na elektrificirovannyh zheleznyh dorogah [Instructions for grounding power supply devices on electrified railways]*. Moscow: 1993 (in Russian).
- [5] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Electrical installation rules. 9th edition]*. Novosibirsk: Normatica, 2020 (in Russian).
- [6] Low-voltage electrical installations. Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics and definitions, GOST R 50571.1-2009 (IEC 60364-1:2005), Aug. 2009.

-
- [7] *CE-750. Pravila bezopasnosti pri eksploatacii kontaktnoj seti i ustrojstv elektrosnabzheniya avtoblokirovki zheleznih dorog [Safety rules for the operation of the contact network and power supply devices for automatic blocking of railways]*. Moscow: TRANSIZDAT, 2000 (in Russian).
- [8] Electromagnetic compatibility of technical means. Man-made noise from electrical transport. Limits and test methods, GOST 29205-91, Jan. 1993.
- [9] Man-made noise from overhead power lines and electric substations. Limits and measuring methods, GOST 22012-82, July 1983.
- [10] Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements, GOST 12.1.004-91, July 1992.
- [11] Short-circuits in electrical installations. Calculation methods of electrodynamics and thermal effects of short-circuit current, GOST R 52736-2007, July 2007.
- [12] *CE-462. Pravila ustrojstva sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznih dorog Rossijskoj Federacii [Rules for the Arrangement of the Traction Power Supply System of the Railways of the Russian Federation]*. Moscow, 1997 (in Russian).
- [13] Predel'no dopustimye urovni magnitnyh polej chastotoj 50 Gc v pomeshcheniyah zhi-lyh, obshchestvennyh zdaniy i na selitebnyh territoriyah [Maximum permissible levels of magnetic fields with a frequency of 50 Hz in residential, public buildings and residential areas], Hygienic standard GN 2.1.8/2.2.4.2262-07, Approved on Aug. 21, 2007 No. 40 (in Russian).
- [14] Stroitel'nye normy i pravila. Stroitel'naya klimatologiya [Building regulations. Building climatology], SNiP 23-01-99, Jan. 2000 (in Russian).
- [15] Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdeystviya [Building regulations. Loads and impacts], SNiP 2.01.07-85, Jan. 1987 (in Russian).
- [16] *STN CE 141-99. Normy proektirovaniya kontaktnoj seti [Normy proektirovaniya kontaktnoj seti]*. Moscow: TRANSIZDAT, 2001 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Жарков Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Yury I. Zharkov, D. Sci. (Eng.), professor of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Попова Наталия Андреевна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Natalya A. Popova, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Фигурнов Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Evgeniy P. Figurnov, D. Sci. (Eng.), professor of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

УДК 537.868

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_83

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ, МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ И ПРИКЛАДНОЙ ЗНАЧИМОСТИ

И.Е. Туманов

Казахский национальный университет имени Аль-Фараби
Алматы, Республика Казахстан
isa.tumani56@mail.ru

Представлен электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний, в котором стандартная частота напряжения питания (50 Гц) на выходе трансформируется в низкочастотный диапазон механических колебаний за счет настройки параметров резонансного контура. Представлены результаты модельных экспериментов в среде *Matlab*. Описан принцип работы и структуры данного устройства, определен характер работы с несколькими видами преобразования энергии: электрической в магнитную и магнитной в механическую. Показано основное требование, предъявляемое к построенной модели – сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях. Построены физические модели всех модификаций электромагнитного возбудителя вибрационного типа. Модель представлена тремя составными частями: электрической, магнитной и механической.

Ключевые слова: вибродвигатель, вибропреобразователь, электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний.

Для цитирования: Туманов, И.Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 83-92. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83

ELECTROMAGNETIC EXCITER OF LOW-FREQUENCY MECHANICAL VIBRATIONS. QUESTIONS OF THEORY, MODELING, DEVELOPMENT AND APPLICATION SIGNIFICANCE

I.E. Tumanov

Al-Farabi Kazakh National University
Almaty, Republic of Kazakhstan
isa.tumani56@mail.ru

Abstract. The article presents an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations, in which the standard frequency of the supply voltage (50 Hz) at the output, is transformed into a low-frequency range of mechanical vibrations by adjusting the parameters of the resonant circuit. The results of model experiments in the Matlab environment are presented. The principle of operation and structure of this device is described and the nature of work with several types of energy conversion is determined: electrical into magnetic and magnetic into mechanical. The main requirement for the constructed model is shown - conservation of energy and power with appropriate transformations. According to the requirements, physical models of all modifications of an electromagnetic exciter of vibration type are built. The model is presented in three parts: electrical, magnetic and mechanical.

Keywords: electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations, vibration motor, vibration transducer.

For citation: I.E. Tumanov, "Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations. questions of theory, modeling, development and application significance", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 83-92, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83

I. Введение

Электромагнитный возбуждатель низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) представляет собой электромеханическую систему, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем (электрической, магнитной и механической) (рис. 1).

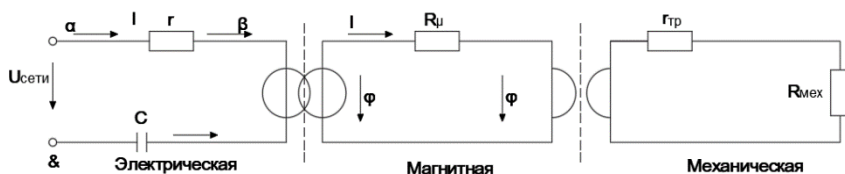


Рис. 1. Теоретико-цепная модель электромеханической системы

Fig. 1. Chain-theoretical model of an electromechanical system

Принципиальное отличие этого вида преобразователя заключается в том, что ЭМВ НЧК обеспечивает низкочастотный диапазон механических колебаний (параметр на выходе) якоря при высокочастотном диапазоне напряжения питания (параметр на входе). Основной причиной недостаточной информации о данном типе вибропреобразователя было предубеждение ученых и инженеров относительно опасности использования резонансных

явлений в силовых цепях в процессе эксплуатации и обслуживания. Впервые схема такого преобразователя была описана Ю.Е. Нитусовым в 1956 г. [1].

Целью исследования и моделирования является развитие основных теоретических положений и принципов функционирования вибропреобразователя на основе анализа его амплитудно- и фазочастотных характеристик и сопоставление с результатами моделирования. В основе функционирования ЭМВ НЧК заложена идея использования в электрической подсистеме «резонанса напряжений», обеспечивающего перепоступление энергии из одной подсистемы в другую и служащего в качестве инструмента преобразования высокочастотной составляющей активных параметров (напряжение питания, ток в цепи и магнитный поток) электрической подсистемы на входе в низкочастотную составляющую активного параметра (тяговое усилие электромагнита) механической подсистемы на выходе [2].

II. Принцип работы ЭМВ НЧК

Принцип работы (возвратно-поступательное движение за счет настройки резонансного контура) и структура ЭМВ НЧК, состоящей из трех разнородных подсистем с несколькими видами преобразования энергии (электрической в магнитную и магнитной в механическую) представлен на рис. 2.

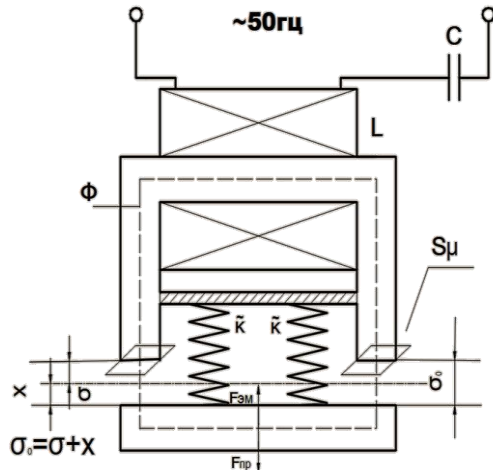


Рис. 2. Конструктивная схема ЭМВ НЧК в однофазном однократном исполнении

Fig. 2. Structural diagram of electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations in single-phase one-cycle execution

Особенностью механической характеристики вибропреобразователя (рис. 3) является условие наличия двузначности модулей $F_{эм}$ и $F_{пр}$ для меняющихся значений δ воздушного зазора в функции времени.

$$F_{\Sigma}(t) = F_{эм} + F_{пр}. \quad (1)$$

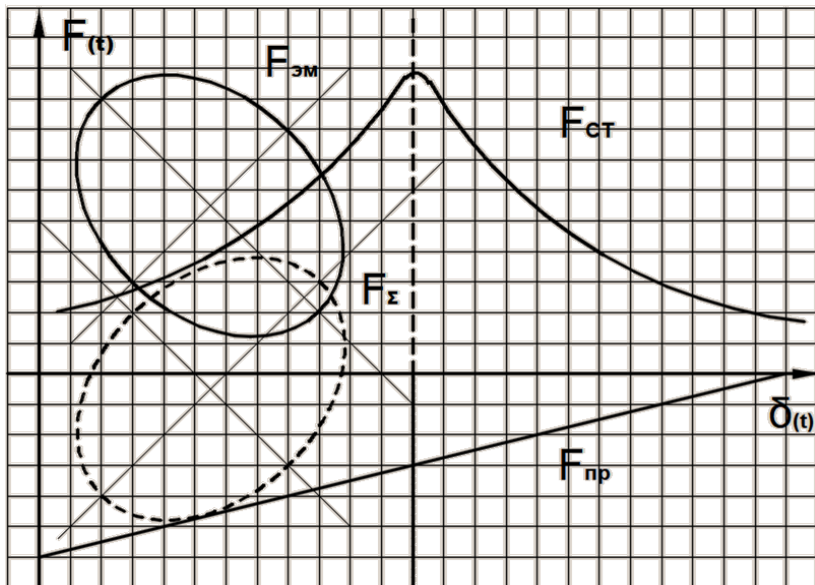


Рис. 3. Механическая характеристика ЭМВ НЧК

Fig. 3. Mechanical characteristics of electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Смысл овала $F_{эм}(t)$ состоит в том, что усилие $F_{\Sigma}(\delta)$ (рис. 3) для обеспечения колебаний якоря должно быть знакопеременным относительно оси абсцисс за цикл колебаний якоря. Это возможно лишь в том случае, если $F_{эм}(\delta)$ обладает двузначностью (чему и удовлетворяет вышеотмеченный овал), таким образом, F_{Σ} приобретает двузначность за счет формы кривой $F_{эм}(\delta)$. При этом модули $F_{эм}$ и $F_{пр}$ для меняющихся значений δ должны сопоставляться так, чтобы указанная двузначность реализовывалась [3].

Резонанс напряжений выполняет функцию «клапана», регулирующего перепоступление энергии из электрической подсистемы в электромагнитную подсистему, и далее в механическую (рис. 1 и 4). На рис. 4 показаны

временные характеристики активных входных параметров (напряжения питания, тока в цепи и магнитного потока), при этом в качестве выходной временной характеристики (тяговое усилие электромагнита) выступает огибающая синусоида модулированных амплитуд входных активных параметров.

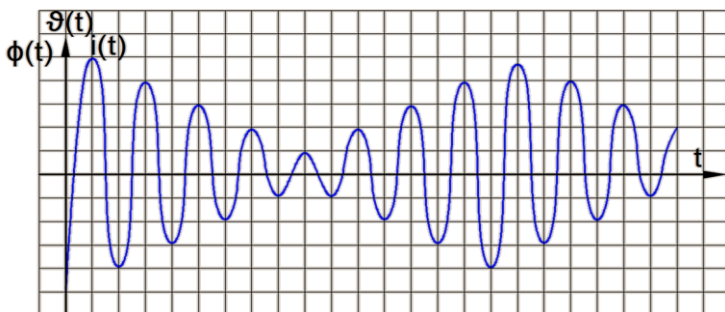


Рис. 4. Процесс биений и модуляции колебаний в вибропреобразователе

Fig. 4. The process of beating and modulation of vibrations in a vibration transducer

III. Анализ характеристик ЭМВ НЧК

Аналитические и модельные методы исследования определили необходимость анализа амплитудно-частотных характеристик вибропреобразователя в их взаимосвязи с фазочастотными характеристиками. Поэтому в [3] было исследовано влияние фазочастотных характеристик вибропреобразователя на режимные параметры функционирования ЭМВ НЧК и разработана научно обоснованная методика построения векторной диаграммы режимных параметров вибропреобразователя на базе расчетно-аналитических исходных экспериментальных данных во взаимосвязи входных и выходных активных параметров.

Векторная диаграмма (рис. 5) показывает, что чем меньше угол расхождения между вектором скорости и вектором тягового усилия электромагнита, тем меньше потери энергии и, соответственно – выше КПД вибропреобразователя. При этом вектор скорости – это тот же вектор перемещения, перпендикулярные друг другу ($\theta_v = \theta_x + 90^\circ$), а последний влияет на закон изменения воздушного зазора во времени:

$$\delta(t) = \delta_0 - X \cdot \sin(v \cdot t + \theta_x) = \delta_0 \cdot [1 - \beta \cdot \sin(v \cdot t + \theta_x)]; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}\theta_F = \frac{\Phi_{(k,-1)} \cdot \sin(\alpha_{(k,0)} - \alpha_{(k,-1)}) + \Phi_{(k,+1)} \cdot \sin(\alpha_{(k,+1)} - \alpha_{(k,0)})}{\Phi_{(k,-1)} \cdot \cos(\alpha_{(k,0)} - \alpha_{(k,-1)}) + \Phi_{(k,+1)} \cdot \cos(\alpha_{(k,+1)} - \alpha_{(k,0)})}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg}\theta_F$ – тангенс угла наклона вектора тягового усилия электромагнита, который определяется и зависит от расположения векторов комбинационных составляющих магнитных потоков [2].

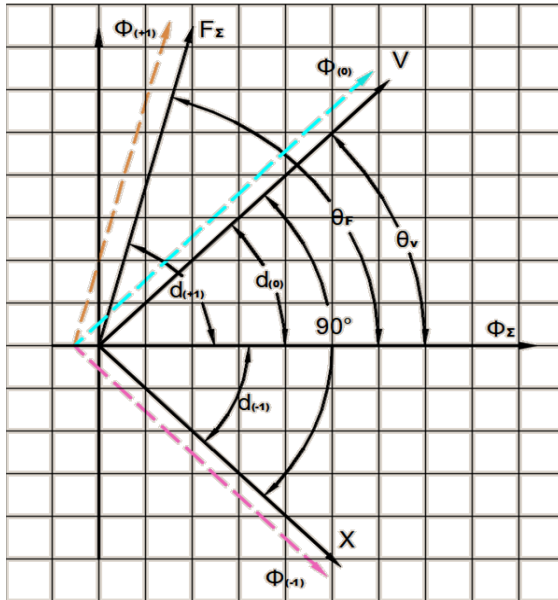


Рис. 5. Векторная диаграмма состояний режимных параметров электромеханической системы, построенная на основе расчетно-аналитических результатов

Fig. 5. Vector diagram of states of operating parameters of an electromechanical system, built on the basis of calculated and analytical results

IV. Результаты моделирования

Полученные в результате моделирования в Matlab осциллограммы активных параметров вибропреобразователя на входе и выходе (рис. 6,7) соответствуют теоретическим выкладкам модели вибропреобразователя, при этом данные по другим модификациям (двухтактный однофазный, трехфазный и с четырехсторонним воздействием на якорь) также аналогичны приведенным [4]:

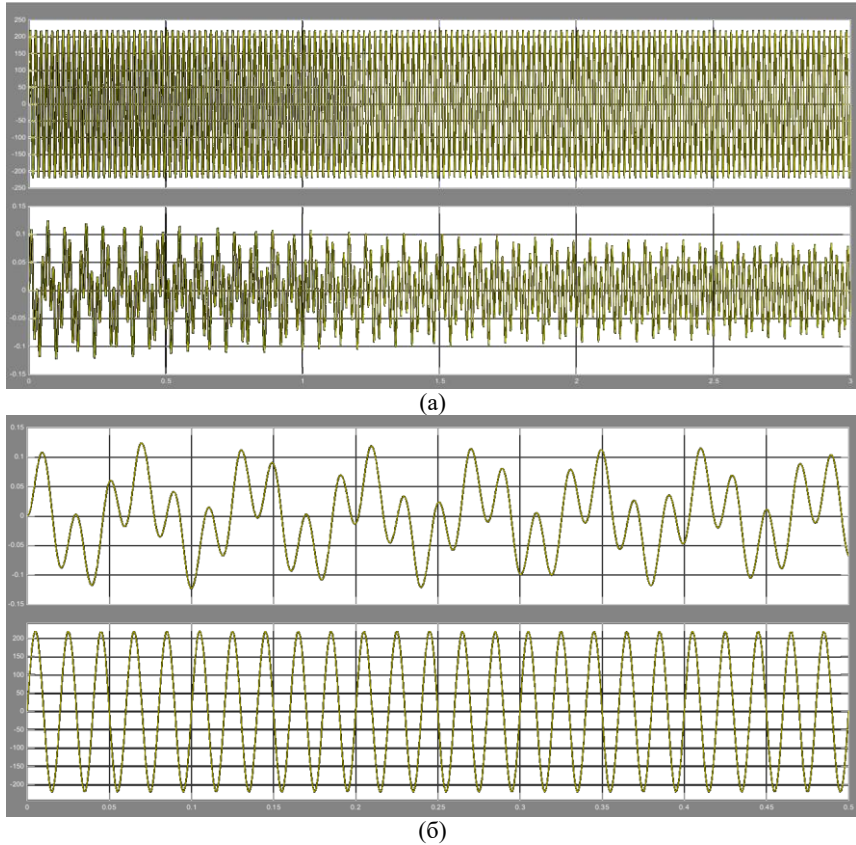


Рис. 6. Осциллограмма тока (а) и напряжения (б) в ЭМВ НЧК

Fig. 6. Oscillogram of current (a) and voltage (b) in electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Осциллограммы показывают характерные процессы биений и модуляции активных параметров на входе вибропреобразователя и характер убывания амплитуды выходного параметра, который, как было отмечено, зависит от угла расхождения между вектором скорости и вектором тягового усилия электромагнита.

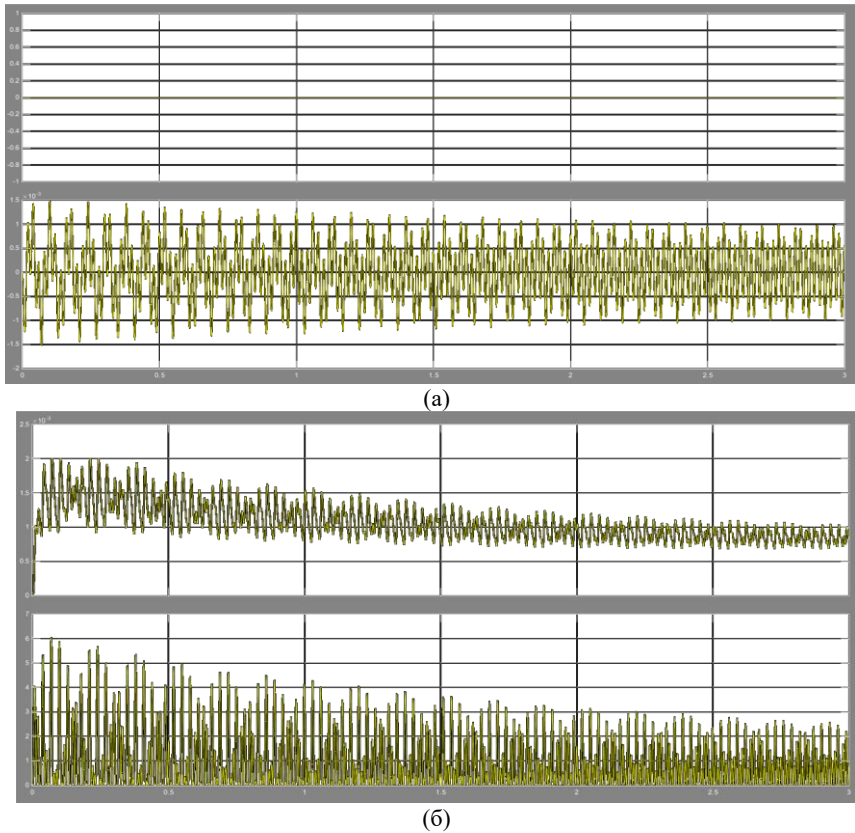


Рис. 7. Осциллограмма магнитного потока (а) и тягового усилия (б) в ЭМВ НЧК

Fig. 7. Oscillogram of magnetic flux (a) and tractive effort (b) in electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

В технической литературе ЭМВ НЧК с последовательно включенным конденсатором получили название «вибродвигателя серии типа МВТУ имени Н.Э. Баумана» и в своем сегменте применения успешно конкурировали с асинхронными двигателями на основе относительной простоты в конструкции и надежности в процессе эксплуатации в качестве низкочастотного вибродвигателя для технологических комплексов по ремонту и приготовлению жидких продуктов с заданными физическими свойствами.

В настоящее время особую актуальность обретают вопросы разработки на базе ЭМВ НЧК тихоходных генераторов переменного тока и преобразователей механической энергии природного происхождения в электрическую в соответствии принципом обратимости в электромеханике [5].

В. Заключение

Экспериментально-расчетные данные (осциллограммы) соответствуют основным теоретическим положениям и принципам функционирования ЭМВ НЧК, в основе которых заложена идея использования в электрической подсистеме резонанса напряжений, обеспечивающего перепоступление энергии из одной подсистемы в другую и реализующего в процессе моделирования преобразование высокочастотной составляющей активных параметров электрической подсистемы на входе в низкочастотную составляющую активного параметра механической подсистемы на выходе. Режимные параметры ЭМВ НЧК определяются на основе функциональных зависимостей амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик электромеханической системы.

В соответствии с принципом работы (возвратно-поступательное движение за счет настройки резонансного контура) и структуры ЭМВ НЧК, идентифицирован характер работы с несколькими видами преобразования энергии: электрической в магнитную и магнитной в механическую, при этом сохраняется условие – «сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях» для всех четырех модификаций ЭМВ НЧК.

© Туманов И.Е., 2021

Поступила в редакцию 08.03.2021

Received 08.03.2021

Библиографический список

- [1] Нитусов Ю.Е. Об одной схеме электромагнитного вибратора // *Электричество*. 1956. № 5. С. 81-84.
- [2] Туманов И.Е. Многомодульный вибропривод на базе электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний, автореф. дис. канд. техн. наук, КазНТУ-МГТУ, Алматы, Республика Казахстан, 2001 – 28 с.
- [3] Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы // *Электротехника*. 2013. № 8. С. 48-52.
- [4] Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kacejko P. Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Т. 736. С. 97-102. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.

- [5] Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B. «The processes in the electromagnetic exciter of low-frequency oscillation in its functioning mode» // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. T. 9. № 9. С. 352-359. DOI: 10,3923/jeasci.2014.352.359.

References

- [1] Yu.E. Nitusov, “Ob odnoj skheme elektromagnitnogo vibratora [About one circuit of an electromagnetic vibrator]”, *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 81-84, 1956 (in Russian).
- [2] I.E. Tumanov, “*Mnogomodul'nyj vibroprivod na baze elektromagnitnogo vzbuditelya nizkochastotnyh kolebanij [Multi-module vibration drive based on an electromagnetic exciter of low-frequency vibrations]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, 2001 (in Russian).
- [3] I.E. Tumanov, “Parametricheskij elektromagnitnyj vzbuditel' nizkochastotnyh mekhanicheskikh kolebanij dlya sistem kontrolya, izmereniya i dozirovaniya massy [Parametric electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations for control systems, measurement and dosing of mass]”, *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, no. 8, pp. 48-52, 2013.
- [4] I.E. Tumanov, S.A. Orynbayev, B. Baibutanov, A. Kruglikov and P. Kacejko, “Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 736, pp. 97-102, March 2015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.
- [5] I.E. Tumanov, S.A. Orynbayev and B. Baibutanov, “The processes in the electromagnetic exciter of low-frequency oscillation in its functioning mode”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, pp. 352-359, 2014. DOI: 10,3923/jeasci.2014.352.359.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Туманов Исакул Елегенович, кандидат технических наук, доцент Казахского национального университета имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан.

Isakul E. Tumanov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 631.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_93

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КПД ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В.А. Тихомиров

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
vat45.tikhomirov@yandex.ru

Е.В. Бычков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
fae_nir@nntu.ru

Энергетические характеристики и показатели качества электроэнергии современных электротехнических систем во многом определяются свойствами преобразовательных устройств, входящих в состав этих систем. Для количественной оценки влияния преобразователей на электротехнические системы необходимо иметь высококачественный инструмент изучения протекающих в преобразовательном устройстве электромагнитных процессов, а также несложную и достоверную методику расчета показателей энергоэффективности. Представлены методологические основы расчета энергетических показателей различных преобразовательных устройств с использованием персонального компьютера и программных средств схемотехнического моделирования. В отличие от существующих аналитических методов расчета энергетических показателей, используемых на практике, предлагается методика расчета КПД с помощью современного пакета схемотехнического моделирования *MicroCap*.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, методика расчета, преобразовательные устройства, схемотехническое моделирование, энергетические показатели.

Для цитирования: Тихомиров В.А., Бычков Е.В. Компьютерный анализ КПД преобразовательных устройств // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 93-109. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_93

COMPUTER ANALYSIS OF CONVERTER DEVICES EFFICIENCY

V.A. Tikhomirov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
vat45.tikhomirov@yandex.ru

E.V. Bychkov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
fae_nir@nntu.ru

Abstract. Energy characteristics and power quality indicators of modern electrical systems are largely dependent and determined by the properties of converting devices that are part of these systems. It is necessary to have a high-quality tool for studying the electromagnetic processes occurring in the converter, as well as a simple and reliable method for calculating energy efficiency indicators, for a quantitative assessment of an impact on the electrical systems from the converters. This article is devoted to the development of methodological foundations for calculating the energy indicators of various converting devices using a personal computer and software for circuit simulation. In contrast to the existing analytical methods for calculating energy indicators used in practice, the authors propose a method for calculating the efficiency using a modern circuit simulation package MicroCap.

Keywords: calculation methodology, circuit simulation, computer modeling, converter, energy indicators.

For citation: V.A. Tikhomirov and E.V. Bychkov, “Computer analysis of converter devices efficiency”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 93-109, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_93

I. Введение

Современные электроустановки для питания различных устройств и систем электропривода, как правило, включают преобразовательные устройства (ПУ). В процессе функционирования в ПУ протекают сложные электромагнитные процессы, которые могут приводить к нежелательным явлениям (прерывистый характер тока нагрузки, несинусоидальность входных и выходных сигналов силовой части). Это, в свою очередь, оказывает существенное и, как правило, негативное влияние на энергетические характеристики и показатели ПУ и электроустановки в целом. Исходя из этого, необходимо принимать во внимание следующие важные требования, предъявляемые к ПУ в процессе их проектирования и эксплуатации:

- устройство должно удовлетворять запросам потребителя как по величине выходного напряжения (или тока), так и по его качественным показателям, среди которых особое значение имеют гармонический состав напряжений и токов на выходе преобразователя;
- преобразователь не должен оказывать негативного воздействия на питающую сеть и иметь высокие энергетические показатели, важнейшими из которых являются:
 - 1) гармонический состав тока на входе преобразователя (т.е., тока, потребляемого из питающей сети);
 - 2) полная мощность, потребляемая из сети и ее составляющие (активная мощность P , реактивная мощность Q , мощность искажения T);
 - 3) коэффициент мощности K_m , $\cos\varphi$, коэффициент искажения $K_{\text{и}}$;
 - 4) устройство должно обладать максимальным коэффициентом полезного действия (КПД) и надежностью.

Целью статьи является качественная и количественная оценка КПД преобразовательных устройств. При этом последовательно решаются следующие задачи:

- построение точных моделей, максимально учитывающих свойства реальных элементов и схемотехнику преобразовательных устройств;
- подготовка и приведение расчетного материала к виду, необходимому для его обработки стандартной программой гармонического Фурье анализа с помощью пакета схемотехнического моделирования *MicroCap*.

Определение основных энергетических показателей ПУ с помощью пакета схемотехнического моделирования *MicroCap* (мощностные составляющие S , P , Q , K_m , $K_{\text{и}}$, $\cos\varphi$ и гармонический состав сетевого тока) было рассмотрено в [1-4]. Эти показатели характеризуют взаимодействие ПУ с питающей сетью. Эффективность преобразования энергии питающей сети в энергию на нагрузке с помощью ПУ характеризует другой важнейший энергетический показатель – КПД.

II. Анализ КПД преобразовательных устройств

Коэффициент полезного действия обычно обозначается буквой η . Для любого преобразователя КПД может быть определен по формуле [5]:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – среднее значение мощности на выходе преобразователя (активная мощность на выходе); $P_{\text{вх}}$ – среднее значение мощности на входе преобразователя (активная мощность, потребляемая из питающей сети).

Выполнить достоверный расчет энергетических характеристик и провести полноценный качественный анализ полученных данных можно по

результатам цифрового математического моделирования. Из всего имеющегося многообразия программных пакетов и систем моделирования предпочтение было отдано пакету программ схемотехнического имитационного моделирования *MicroCap (MC)* [6-8].

Пакет моделирования *MicroCap* использует подробные, с высокой степенью детализации, модели полупроводниковых элементов, максимально отражающие и учитывающие их реальные физические свойства. Это подтверждается вольтамперными и выходными характеристиками различных элементов, полученными с помощью вычислительных экспериментов в программной среде *MC*. Ниже приведены схемы замещения моделей самых распространенных полупроводниковых элементов, используемых в преобразовательных устройствах, а также их характеристики.

III. Моделирование вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода

Схемы для моделирования вольтамперной характеристики полупроводникового диода и полученная с помощью модели ВАХ показаны соответственно на рис. 1 и 2.

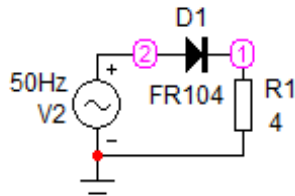


Рис. 1. Схема модели для получения ВАХ диода

Fig. 1. Model circuit for obtaining the current-voltage characteristic of the diode

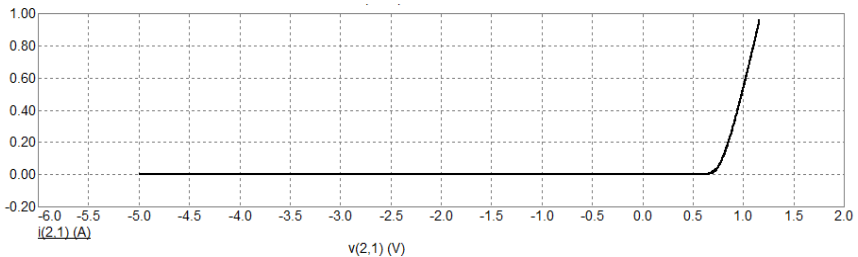


Рис. 2. Вольтамперная характеристика диода

Fig. 2. Current-voltage characteristic of the diode

Для получения вольтамперной характеристики были установлены параметры вычислительного процесса путем заполнения соответствующих полей специализированной формы «Установки анализа переходных процессов» (рис. 3).

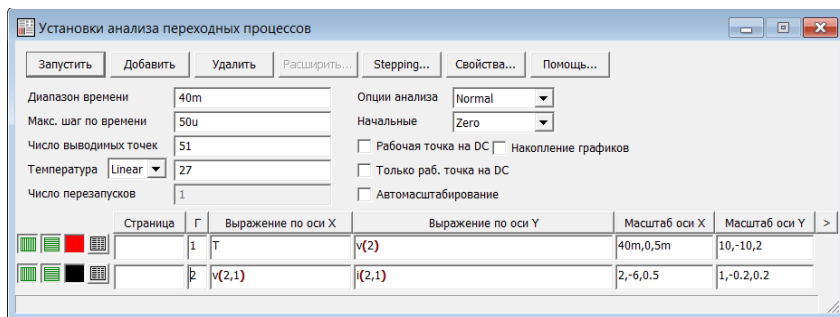


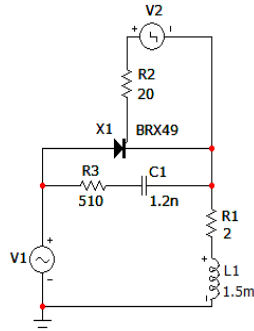
Рис. 3. Установки анализа для получения ВАХ диода

Fig. 3. Analysis setup for obtaining the current-voltage characteristic of diode

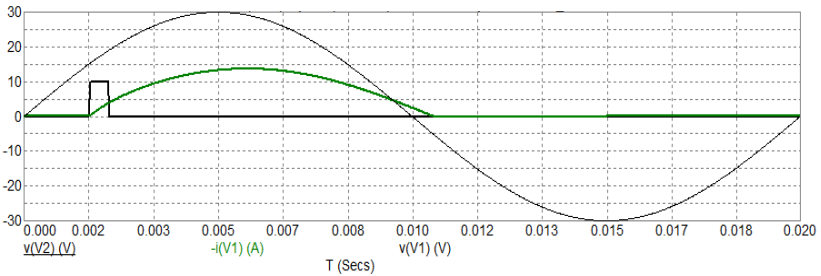
Из рис. 2 следует, что в схемах исследуемых преобразователей используется математическая модель диода, которая воспроизводит реальную характеристику с падением напряжения около 1,0 В на прямой ветви характеристики и пренебрежимо малым обратным током на участке обратной ветви. Таким образом, при анализе энергетических показателей будут учтены реальные потери от протекающего по диоду тока.

IV. Моделирование вольтамперной характеристики тиристора

Схемы для моделирования ВАХ тиристора и полученная с помощью модели характеристика представлены соответственно на рис. 4 и 5. Компьютерная модель тиристора обладает реальной характеристикой с падением напряжения около 1,7 В на прямой ветви характеристики и пренебрежимо малым обратным током на обратной ветви. Таким образом, при анализе энергетических показателей также будут учтены потери от протекающего по тиристорному току.



(a)



(б)

Рис. 4. Схема модели для получения ВАХ тиристора (а); процессы в схеме (б)

Fig. 4. Model circuit for obtaining the current-voltage characteristic of the thyristor (a); processes in the circuit (b)

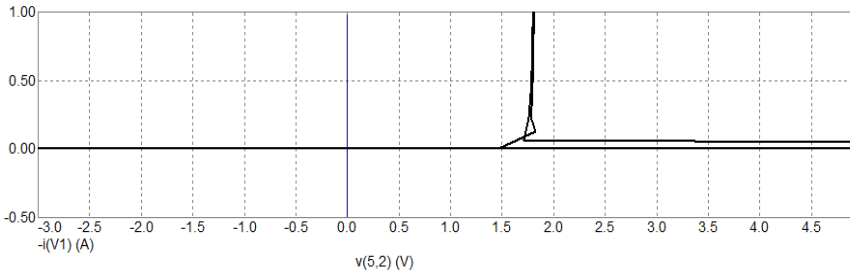


Рис. 5. Вольтамперная характеристика тиристора

Fig. 5. Current-voltage characteristic of the thyristor

V. Моделирование выходных характеристик IGBT транзистора

Схема для моделирования выходных характеристик IGBT транзистора и полученные с помощью модели характеристики представлены соответственно на рис. 6 и 7.

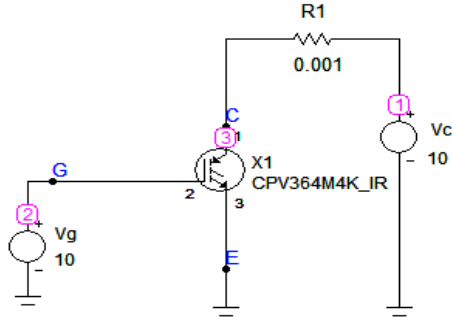


Рис. 6. Схема модели для получения выходных характеристик IGBT транзистора

Fig. 6. Schematic of the model for obtaining the output characteristics of the IGBT transistor

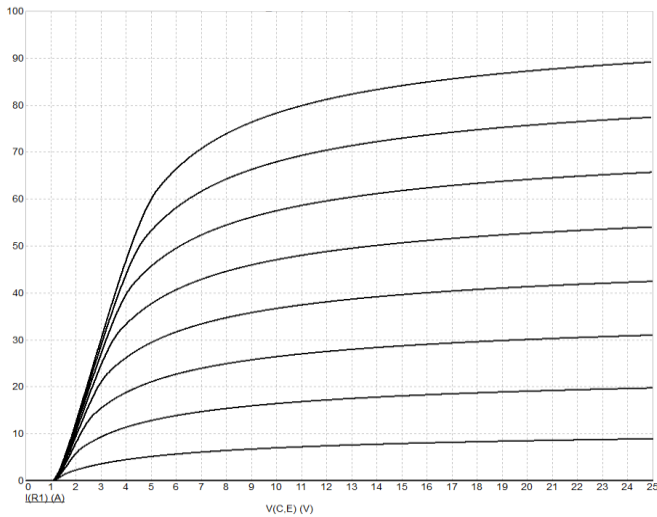


Рис. 7. Выходные характеристики IGBT транзистора

Fig. 7. Output characteristics of the IGBT transistor

Для получения семейства выходных характеристик были установлены параметры и выбраны уставки путем заполнения соответствующих полей специализированной формы «Установки анализа по постоянному току (DC)» (рис. 8). Полученные на модели выходные характеристики *IGBT* транзистора соответствуют реальным характеристикам этого полупроводникового прибора. В процессе моделирования преобразователей воспроизводится реальная картина поведения прибора с точки зрения оценки энергетических показателей различных преобразователей.

Согласно (1), для расчета КПД требуется определение активных мощностей на входе и выходе преобразовательного устройства. В соответствии с [9], активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период от мгновенной мощности:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \cdot dt.$$

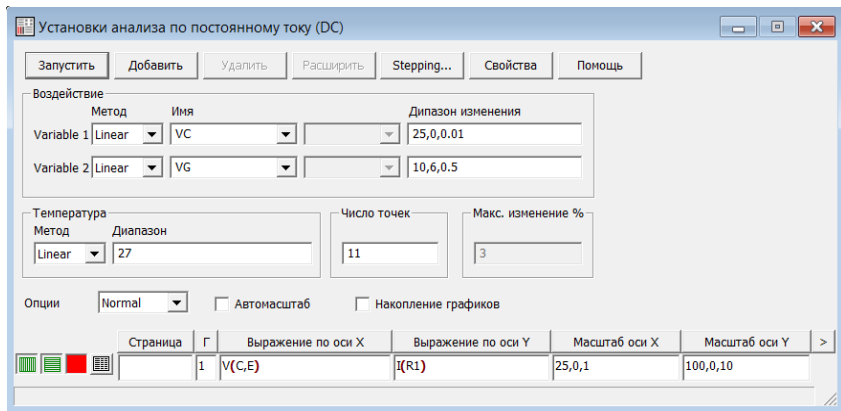


Рис. 8. Установки *DC* анализа для получения выходных характеристик *IGBT* транзистора

Fig. 8. *DC* analysis settings to obtain the output characteristics of the *IGBT* transistor

В [3] для расчета энергетических показателей было предложено использовать офисный пакет *Microsoft Excel*, с помощью которого обрабатывались результаты моделирования преобразовательных устройств, полученные в программе *MicroCap*. Поскольку для расчета КПД требуется вычисление только активных мощностей на входе и выходе преобразовательного устройства, можно отказаться от использования пакета *Microsoft Excel* и все расчеты проводить непосредственно в программе *MicroCap*, используя воз-

возможности встроенной функция *harm*. Эта функция позволяет получить гармонический ряд Фурье для кривой мгновенной мощности. Разложение в ряд Фурье – это способ представления сложной функции с помощью бесконечной суммы гармонических функций синуса и косинуса.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t)). \quad (2)$$

Здесь a_0 , a_n и b_n – коэффициенты Фурье; n – порядковый номер гармонической составляющей. Коэффициент a_0 – постоянная составляющая исходной функции, т.е., ее среднее значение. Внутри диапазона от 0 до T коэффициент a_0 определяется следующим выражением:

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot dt. \quad (3)$$

Применительно к задаче определения КПД ПУ, именно постоянная составляющая, полученная в результате гармонического анализа функции мгновенной мощности, позволяет определить активную мощность на входе и выходе преобразовательной схемы.

IV. Пример расчета КПД тиристорного преобразователя

В качестве примера для расчета КПД тиристорного преобразователя рассмотрена схема модели [4], в которой его анализ выполнен с учетом реальных пульсаций выпрямленного тока. Для расчета КПД компьютерная модель была дополнена сетевыми реакторами и RC цепями, которые практически всегда имеются в реальном ПУ. Схема модели в окончательном виде представлена на рис. 9.

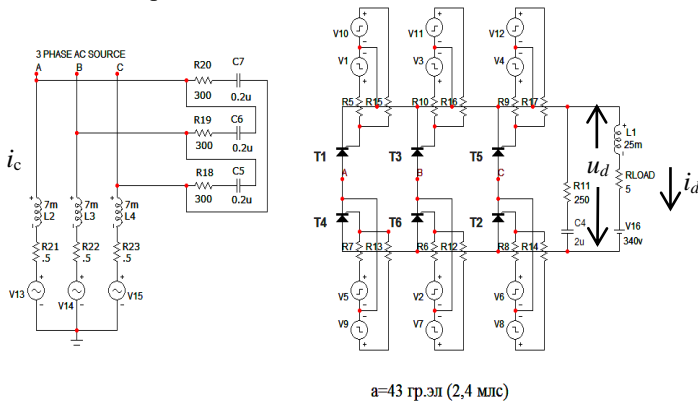


Рис. 9. Схема модели трехфазного управляемого выпрямителя для анализа его КПД

Fig. 9. Schematic model of a three-phase controlled rectifier for efficiency analysis

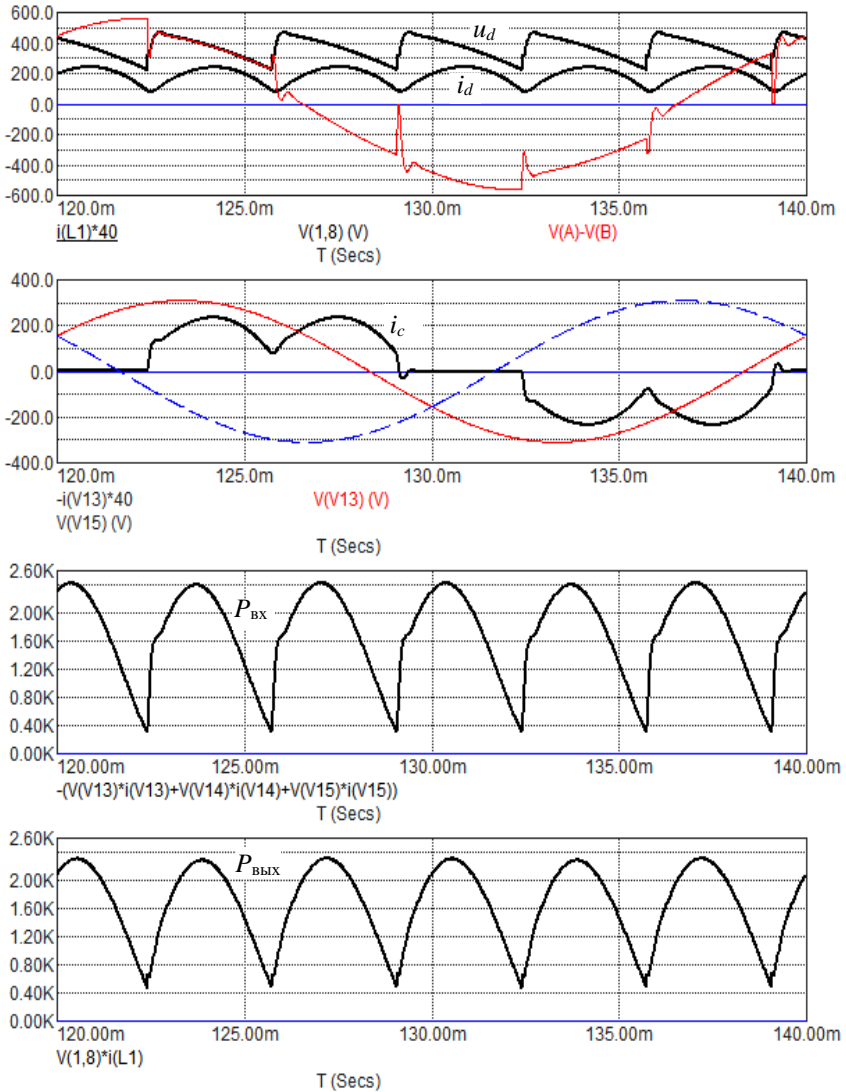


Рис. 10. Результаты моделирования трехфазного управляемого выпрямителя при реальных пульсациях выпрямленного тока

Fig. 10. Results of modeling a three-phase controlled rectifier with real ripple of the rectified current

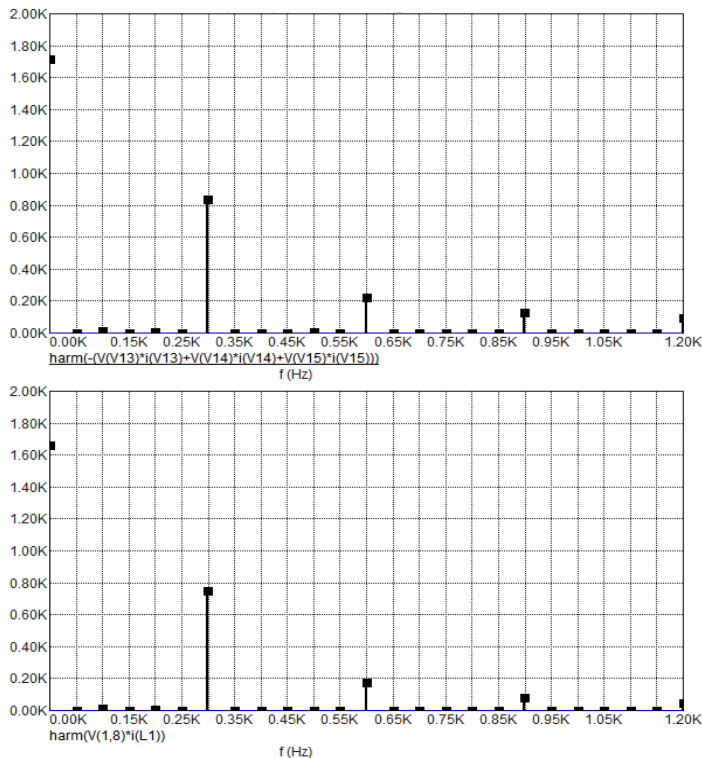


Рис. 11. Гармонический состав функций мгновенных значений мощности на входе и выходе тиристорного преобразователя

Fig. 11. Harmonic composition of functions of instantaneous power values at the input and output of the thyristor converter

Осциллограммы электромагнитных процессов, полученные компьютерным моделированием в программном пакете *MicroCap*, приведены на рис. 10. На первом графике (в порядке расположения) приведены диаграммы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d . На втором графике показан ток питающей сети i_c . На третьем и четвертом графиках представлены осциллограммы мгновенных значений мощности соответственно на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$ преобразователя, которые необходимы для расчета КПД. Для этих функций с помощью *harm* выполнено разложение в ряд Фурье. Результаты представлены на рис. 11.

С помощью Фурье-анализа в модели были рассчитаны значения мощностей и рассчитано КПД с использованием (1):

```
f harm(- (V(V13) *i(V13)+V(V14) *i(V14)+V(V15) *i(V15))) harm(V(1,8) *i(L1))
(Hz)
0.0 1715.1558 1664.1165
```

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{1664,1165}{1715,1558} = 0,9702 \approx 97\%.$$

В результате применения предложенной методики получено значение КПД, равное 97 %, что соответствует типовым значениям для тиристорных преобразователей.

КПД управляемых преобразовательных устройств значительным образом зависит от их режимов работы (частоты питающего напряжения, напряжения на выходе) и от тока нагрузки. Предлагаемая методика расчета позволяет выполнить многовариантный анализ энергетических показателей при всех возможных режимах работы и нагрузках. По результатам анализа появляется возможность построения зависимости КПД от режимных параметров (например, при изменении тока нагрузки или при регулировании выпрямленного напряжения U_d за счет изменения угла управления α).

В качестве примера многовариантного анализа можно рассмотреть влияние тока нагрузки на КПД тиристорного преобразователя. Для этого достаточно изменять величину ЭДС двигателя. Например, уменьшение ЭДС приводит к увеличению тока. Это равносильно увеличению нагрузки на валу двигателя постоянного тока, при этом ЭДС снижается. Окно задания ступенчатого изменения ЭДС в программе *MicroCap* изображено на рис. 12.

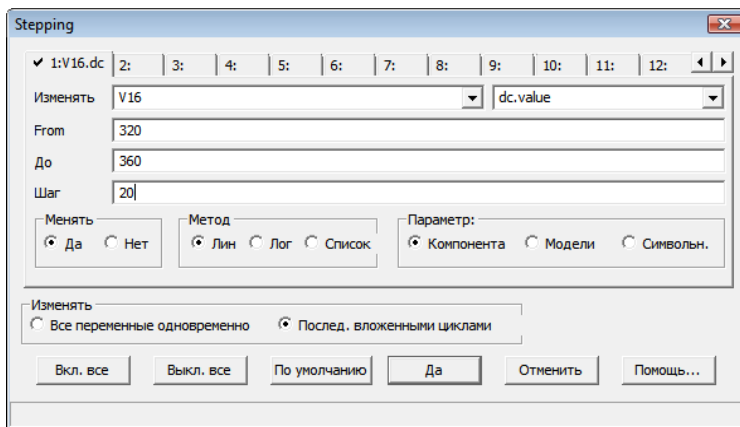


Рис. 12. Интерфейс формирования ступенчатого изменения ЭДС в диапазоне от 320 В до 360 В с шагом 20 В

Fig. 12. Interface for the formation of a step change in EMF in the range from 320 V to 360 V with a step of 20 V

Изменяемая в модели величина $V16$ – это ЭДС двигателя. Моделирование производится при трех значениях ЭДС. Это: 360 В, 340 В и 320 В соответственно. Осциллограммы, иллюстрирующие влияния ЭДС на ток двигателя, изображены на рис. 13.

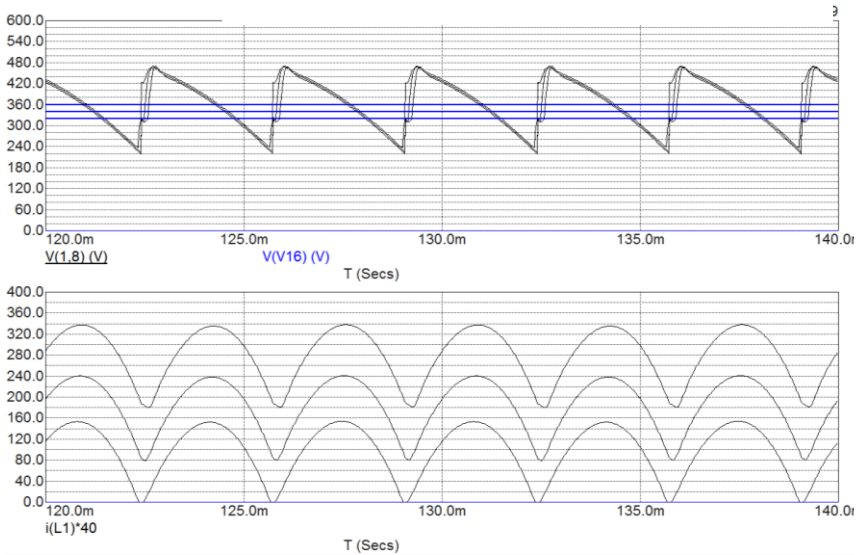


Рис. 13. Осциллограммы выходного напряжения и тока преобразователя для примера многовариантного анализа

Fig. 13. Oscillograms of the output voltage and current of the converter for an example of multivariate analysis

С уменьшением амплитуды выпрямленного тока в форме выходного напряжения преобразователя наблюдается заметное сокращение длительности интервала коммутации.

Гармонический состав мощностей на входе и выходе преобразователя, полученный в результате выполнения Фурье анализа при разных ЭДС, представлен на рис. 14. Постоянная составляющая a_0 функции мгновенной мощности уменьшается с уменьшением тока нагрузки. Для каждого из трех значений гармоник на нулевой частоте могут быть определены соответственно три значения КПД.

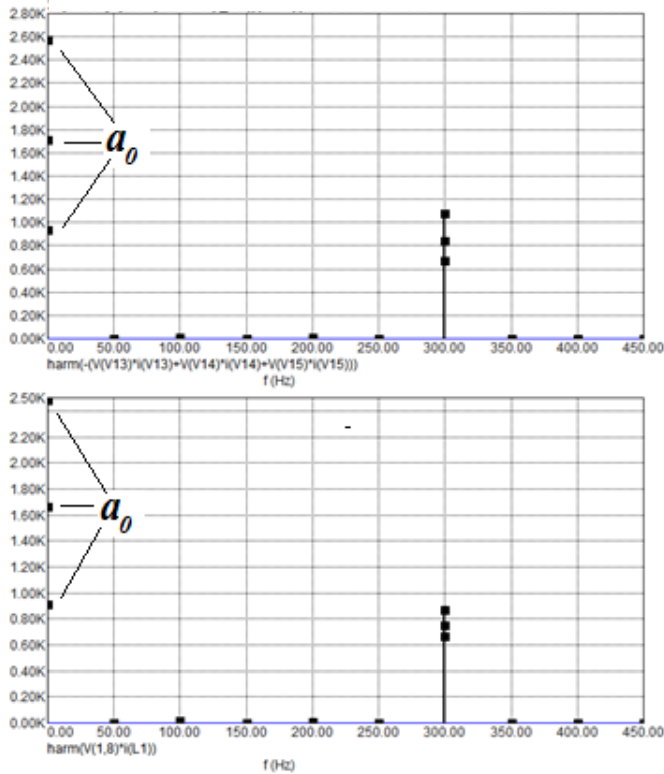


Рис. 14. Результаты Фурье анализа мгновенных мощностей преобразователя при разных ЭДС для примера многовариантного анализа

Fig. 14. Results of Fourier analysis of instantaneous power of the converter at different EMF for an example of multivariate analysis

VII. Заключение

Компьютерные программы предоставляют широкие возможности как для изучения рабочих процессов в электроустановках, так и для расчета энергетических показателей электрооборудования. Для изучения рабочих процессов была использована программа схемотехнического моделирования электронных устройств *MicroCap*. С помощью этой программы был выполнен компьютерный анализ КПД одного из распространенных преобразовательных устройств.

При применении мощных преобразовательных устройств необходимо уделять пристальное внимание анализу их энергетических показателей (в частности, КПД), чтобы иметь возможность оценить их энергетическую эффективность.

По результатам многовариантного анализа полученных количественных характеристик могут быть предложены практические рекомендации по усовершенствованию структуры и параметров ПУ.

© Тихомиров В.А., 2021

© Бычков Е.В., 2021

Поступила в редакцию 26.01.2021

Received 26.01.2021

Библиографический список

- [1] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [2] Тихомиров В.А., Хватов С.В. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2011. № 3 (90). С. 204-214.
- [3] Тихомиров В.А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2018. № 3 (122). С. 92-106. DOI: 10.46960/1816-210X_2018_3_92.
- [4] Тихомиров В.А., Бычков Е.В. Компьютерный анализ энергетических показателей преобразовательных устройств. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2020. – 89 с.
- [5] Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2001. – 199 с.
- [6] Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью *Micro-CAP 7*. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.
- [7] Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования *Micro-CAP 8*. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
- [8] Коротков А.С. Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС. СПб.: СПб ГПУ, 2004. – 68 с.
- [9] Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.

References

- [1] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Khvatov, “Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83), pp. 190-204, 2010.
- [2] V.A. Tikhomirov and S.V. Khvatov, “Benchmark analysis of the harmonic composition of the network current of the controlled rectifiers and frequency converters”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (90), pp. 204-214, 2011.

- [3] V.A. Tikhomirov, "Method of calculation of energy indicators of conversion devices", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (122), pp. 92-106, 2018. DOI: 10.46960/1816-210X_2018_3_92.
- [4] V.A. Tikhomirov and E.V. Bychkov, *Komp'yuternyj analiz energeticheskikh pokazatelej preobrazovatel'nyh ustrojstv [Computer analysis of energy indicators of converting devices]*. Nizhny Novgorod: NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2020 (in Russian).
- [5] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoy elektroniki [Fundamentals of power electronics]*. Novosibirsk: NSTU, 2001 (in Russian).
- [6] V.D. Razevig, *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie s pomoshch'yu Micro-CAP 7 [Schematic modeling using Micro-CAP 7]*. M.: Hotline - Telecom, 2003 (in Russian).
- [7] M.A. Amelina and S.A. Amelin, *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-CAP 8 [Schematic simulation program Micro-CAP 8]*. M.: Hotline - Telecom, 2007 (in Russian).
- [8] A.S. Korotkov, *Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya i modelirovaniya RES [Fundamentals of computer design and modeling of radio electronic devices]*. SPb: SPb GPU, 2004 (in Russian).
- [9] V.S. Rudenko, V.I. Senko and I.M. Chizhenko, *Preobrazovatel'naya tehnika [Conversion technology]*. Kiev: Vishcha school, 1983 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тихомиров Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir A. Tikhomirov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бычков Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Evgeny V. Bychkov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 1

Nizhny Novgorod 2021

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2021. No. 1 (13). – 112 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.ntnu.ru>

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2021

CONTENTS

CHRONICLES	4
Georgy Borisovich Onishchenko. On the occasion of the 90th birthday.....	4
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	7
M.A. Averbukh, A.D. Kuznetsova. Active rectifiers modes design particularity for the variable speed electrical drives of an overhead crane.....	7
V.N Krysanov, I.A. Khaichenko, V.V. Babenko, Y.V. Nefedov. Algorithm for controlling static converters in mixed load manufacturing to increase electromagnetic compatibility of electrical equipment.....	19
A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya, V.V. Chikin. Model of differentiated tariff for control of reactive power consumption.....	31
A.Yu. Smirnov, E.N. Aleksandrova, V.V. Isakichev. Refining of magnetic field parameters in tooth zone of inductor machine.....	53
S.N. Iurtaev, T.O. Koforova. Efficiency of capital investments of energy supplying organizations.....	64
Yu.I. Zharkov, E.P. Figurnov, N.A. Popova. Safety requirements for railway power lines with voltage up to 35 kV	74
I.E. Tumanov. Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations. Questions of theory, modeling, development and application significance.....	83
POWER ENGINEERING	93
V.A. Tikhomirov, E.V. Bychkov. Computer analysis of efficiency converter devices.....	93

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 01.04.2021. Дата выхода в свет: 20.05.2021

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24