

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

№ 12 (84)

2007

ISSN 1990-8512

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Выпуск 7

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Редакционная коллегия:

д.т.н., профессор, член-корреспондент АЭН РФ **Ю.И. Хохлов** (*отв. редактор*);

к.т.н., доцент **Б.Г. Булатов** (*зам. отв. редактора*);

к.т.н., доцент **Л.Т. Волков**; **Д.В. Коробатов** (*отв. секретарь*);

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ **Е.В. Торопов**;

д.т.н., профессор **Л.И. Цытович**; д.т.н., профессор **Ш.Н. Хусаинов**

СОДЕРЖАНИЕ

Теплоэнергетика

ОСИНЦЕВ В.В., СУХАРЕВ М.П., КУЗНЕЦОВ Г.Ф., ТОРОПОВ Е.В. Пути улучшения технологии комбинированного сжигания газа и твердого топлива на котлах БКЗ-210-140Ф второй очереди Челябинской ТЭЦ-2..... 3

ШАШКИН В.Ю., ТОРОПОВ Е.В. Оценка эффективности насадок регенеративных теплообменных аппаратов 5

Преобразовательная техника

ХОХЛОВ Ю.И., БАШМАКОВА Н.Ю., ДЗЮБА М.А. Тиристорный выпрямительный агрегат в режимах потребления и генерирования реактивной энергии в условиях электролиза алюминия 7

ХОХЛОВ Ю.И., ПРОХОРОВ В.В. Один из способов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением..... 13

Содержание

ГЕЛЬМАН М.В., ХУСАИНОВ Р.З., ДУДКИН М.М., ТЕРЕЩИНА О.Г. Комплексный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники	19
САПРУНОВА Н.М. Переходный процесс в широтно-импульсном преобразователе постоянного напряжения	25
ЛОХОВ С.П., ТУРАЕВ А.Е. Экспериментальное исследование полевой модели диода ..	29
ДУДИН М.М. Помехоустойчивость фазосдвигающих устройств с различным принципом построения	32
Электромеханика и электропривод	
УСЫНИН Ю.С., ВИНОГРАДОВ К.М. Генераторная установка с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения	37
БОРИСОВ А.М., ДРАЧЕВ Г.И., ЛЯХ Н.Е., НЕСТЕРОВ А.Н., ШИШКОВ А.Н. Автоматизация режимов работы механизмов подъема кранов с синхронными электроприводами ...	41
Электроэнергетика	
ГОРШКОВ К.Е., КОРОВИН Ю.В., ПАХОМОВ Е.И. Методика применения П-образных схем замещения трансформаторов в расчетах токов короткого замыкания на ЭВМ	45
ТАРАСЕНКО В.М. Проблема выбора уставок резервных защит в электрических сетях 110–220 кВ	50
ШУМАКОВ И.Ю., ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., СЕРОВ Н.П. Локализация развивающейся системной аварии в крупном промышленном энергоузле	53
Научно-методические вопросы	
САВИНОВА Д.В. Применение имитационного моделирования при изучении курса ТОЭ	58

УДК 621.314.632

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОГО СЖИГАНИЯ ГАЗА И ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА КОТЛАХ БКЗ-210-140Ф ВТОРОЙ ОЧЕРЕДИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ТЭЦ-2

*В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов
г. Челябинск, ЮУрГУ*

Рассматривается состояние топочного оборудования котлов Челябинской ТЭЦ-2. Дается анализ работы топок на газе и угольной пыли при различной степени модификации горелочных устройств. Оцениваются перспективы перехода к системе сжигания топлива с рассредоточенным вводом в топку реагентных потоков.

На Челябинской ТЭЦ-2 продолжается начатое в конце прошлого столетия обновление существующих факельных технологий комбинированного сжигания газа и твердого топлива с реконструкцией горелок. Это связано как с резким ухудшением качества поступающего на ЧТЭЦ-2 местного угля, характеристики которого существенно отличаются от проектных высоким содержанием золы и влаги, так и с высоким выходом оксидов азота в продуктах сгорания. При работе котлов на угле активизируется процесс загрязнения топок шлаковыми отложениями, снижается паровая нагрузка, увеличиваются аварийные остановы на расшлаковку. На котлах первой очереди мероприятие по улучшению технологии сжигания топлива завершилось внедрением прямоточных многофункциональных горелок со значительно улучшенными показателями факельного процесса. На второй очереди, где установлены такие же котлы, но с другими исходными по заводскому проекту горелками, использование того же технического мероприятия потребовало бы больших затрат. Здесь принято решение о проведении дополнительных исследований с отработкой упрощенной конструкции не менее эффективных горелочных устройств.

Проведенные сравнительные испытания котлов с горелками различной степени модификации показали, что с переходом от существующего вихревого (закрученного) способа ввода реагентов в топку к прямоточному уменьшаются тепловые потоки в направлении металлоконструкций и обмуровки горелочных амбразур, это обеспечивает повышение их надежности.

При сжигании газа минимизируется выход оксидов азота, а при сжигании угля снижается активность шлакования топки и ширм, что открывает возможность увеличения паропроизводительности котлов.

Вместе с тем при испытаниях было показано, что независимо от типа горелочных устройств неравномерная загрузка питателей сырого угля и мельниц топливом, а горелок пылью обуславливает серьезные трудности с эксплуатацией котлов в части организации бесшлаковочной работы. Локальные очаги повышенного тепловыделения вызывают повышение температурного уровня факела с расплавлением частиц породы и оседанием их на экранирующих трубах топки. Для уменьшения активности процесса шлакования вынуждены увеличивать долю вторичного воздуха, а тепловую нагрузку ограничить величиной 0,75–0,85 Дн (Дн = 210 т/ч).

Дальнейшее совершенствование конструкции прямоточных горелок следует связывать с рассредоточением узлов ввода пылевоздушных и вторичных воздушных потоков в амбразурах, исключаящее их перемешивание до начала воспламенения топливных частиц. Ввод в топку реагентов по такой технологии, как показывает опыт работы котлов БКЗ-210-140Ф первой очереди ЧТЭЦ-2, обеспечивает снижение концентрации оксидов азота в дымовых газах до ~450 мг/нм³ (практически вдвое).

При проектировании новых систем сжигания с рассредоточенным вводом реагентов в топку (и заменах существующих) следует учитывать особенности зажигания топливных масс. От организации термогазодинамического процесса на участке воспламенения, развиваемого уровня температуры во многом зависит объем негативных последствий факельного сжигания угольной пыли и газа: чрезмерное переохлаждение пылеугольного факела может вызвать повышение степени механического недожога, газового сажеобразования. Чрезмерный же разогрев пылеугольных частиц обуславливает активизацию загрязнения топочных камер и ширм.

Вариантные тепловые расчеты котлов в обязательном порядке должны охватывать все особенности эксплуатационной загрузки горелок топливом, в том числе по ярусам и вертикальным ря-

дам. Это позволит заранее предусмотреть не только саму опасность, но и место загрязнения топки и ширм, а также разработать более эффективные мероприятия по очистке поверхностей нагрева.

Осинцев Владимир Валентинович – канд. техн. наук. Окончил кафедру ПТЭ ЧПИ (ЮУрГУ) в 1971 г., заочную аспирантуру кафедры парогенераторостроения МЭИ в 1983 г. Область научных интересов: термогазодинамика топок, котловых газоходов, печей, теплоиспользующих установок.

Сухарев Михаил Павлович – инженер. Окончил кафедру ПТЭ ЧПИ (ЮУрГУ) в 1973 г. Прошел путь от машиниста до управляющего энергосистемой. Участник и руководитель пусков основного энергооборудования и ТЭС в эксплуатацию. В настоящее время – главный инженер Челябинской ТЭЦ-2. Область научных интересов – топочное и горелочное оборудование ТЭС.

Кузнецов Геннадий Фёдорович – доктор технических наук, профессор ЮУрГУ

Торопов Евгений Васильевич – профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» ЮУрГУ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В.Ю. Шашкин, Е.В. Торопов
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматривается подход к оценке теплогидродинамической эффективности поверхности теплообмена регенеративных теплообменных аппаратов.

Важнейшим показателем совершенства теплообменного аппарата является энергетическая или теплогидродинамическая эффективность профиля рабочей поверхности и в целом каналов, по которым движется рабочая среда

Чем эффективнее используется энергия потоков в целях интенсификации теплоотдачи, тем выше коэффициент теплопередачи в аппарате данной конструкции при постоянном гидравлическом сопротивлении и тем более рациональна форма рабочей поверхности. Энергетическая эффективность формы поверхности и профиля каналов, в конечном счете, определяет общие размеры поверхности теплопередачи в аппарате при заданной тепловой нагрузке, температурных и гидромеханических условиях работы.

Теплообменные аппараты более совершенные в теплогидродинамическом смысле позволяют повысить температуру нагреваемого теплоносителя и получить больший энергосберегающий эффект в теплотехнологическом процессе при тех же габаритах установки.

При фиксации температуры нагреваемого теплоносителя, когда теплообменный аппарат входит в единую тепловую схему с другими устройствами, высокоэффективные поверхности нагрева позволяют снизить массогабаритные показатели, что особенно важно для транспортных установок

В экономическом плане более совершенные поверхности нагрева позволяют более рационально распорядиться текущими затратами энергии на перемещение теплоносителя в направлении получения заданной тепловой мощности Q , Вт.

Совершенство теплообменной поверхности с энергетической точки зрения можно охарактеризовать соотношением переданного количества тепла Q через данную поверхность теплообмена и энергии N , затраченной движущимся теплоносителем на преодоление сопротивления [1]

$$E = \frac{Q}{N} = \frac{\alpha F}{V \Delta p}, \quad (1)$$

где V – объемный расход теплоносителя, м³/с; F – площадь теплообменной поверхности, м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); Δp – гидродинамическое сопротивление при перемещении теплоносителя относительно поверхности теплообмена, Па.

Мощность, затрачиваемая на перемещение теплоносителей в теплообменнике, определяет в

значительной степени величину коэффициента теплоотдачи или общую теплопроизводительность аппарата. Абсолютное значение коэффициента E не может служить мерой теплогидродинамического совершенства теплообменного аппарата, а полезно только при сопоставлении двух или нескольких аппаратов.

В регенеративных воздухонагревателях доменных печей применяются насадки с каналами различного вида и выполненные из различных материалов, эти насадки имеют различные теплогидравлические характеристики.

Потери напора в каналах насадки в общем случае складываются из преодоления сопротивления входа в каналы $\Delta P_{вх}$, потери напора на преодоление трения в каналах $\Delta P_{тр}$ и потерь напора на преодоление сопротивления при выходе из каналов в поднасадочное устройство $\Delta P_{вых}$, включая сопротивление поднасадочных устройств, колонн, решеток и т.д. Полагая, что $\Delta P_{вх}$ и $\Delta P_{вых}$ не зависят в значительной степени от типа теплообменной поверхности насадки, будем относить все затраты мощности на перемещение продуктов сгорания в период нагрева только к $\Delta P_{тр}$.

Строго говоря, чистые потери на преодоление сил трения относятся только к простым каналам, не имеющим турбулизирующих элементов макроразмера. Большинство типов насадок с улучшенными теплообменными характеристиками имеют подобные турбулизирующие элементы, но при экспериментальном изучении их теплогидравлических характеристик потери на преодоление местных сопротивлений турбулизирующих элементов условно относят к относительной длине канала l/d , тем самым обеспечивается точность расчетов по формуле для потерь напора на преодоление сил трения

$$\Delta P_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2}. \quad (2)$$

Число Эйлера для подобных условий течения в каналах насадки можно определить по формуле

$$Eu = \frac{\Delta P_{тр}}{\rho w^2} = \lambda \frac{l}{2d}. \quad (3)$$

При известной из опытов гидравлической характеристике $\lambda = A Re^m$ эта зависимость преобразуется к виду

$$Eu = \frac{1}{2} A Re^m \frac{l}{d}. \quad (4)$$

Затраты мощности на перемещение теплоносителя с учетом только преодоления сил трения N_{tr} , Вт, определяются произведением $\Delta P_{тр} V_{\Sigma}$, где V_{Σ} – общий расход продуктов сгорания, определяемый произведением $V_{\Sigma} = B V_{\alpha}$, м³/с, где B – расход топлива, м³/с, V_{α} – удельный выход продуктов сгорания, зависящий от состава топлива и коэффициента расхода воздуха α .

Общее живое сечение каналов насадки $F_{ж} = f_{ж} F_{нас}$ определяется произведением удельного живого сечения $f_{ж}$, м²/м², и поперечного сечения камеры насадки $F_{нас}$, м². При заданных размерах камеры насадки $F_{нас}$, м² и $H_{нас}$, м, получаем $V_{нас} = F_{нас} H_{нас}$ и $l = H_{нас}$ в формуле (3). Полная поверхность теплообмена насадки F определяется произведением $F = V_{нас} f_{уд}$, где $f_{уд}$ – удельная поверхность нагрева насадки в единице объема, м²/м³.

Рассмотрим три насадки. Примем расход газа через насадки $V_{\Sigma} = 100000$ м³/ч = 27,8 м³/с; $F_{нас} = 30$ м²; $Re > 2500$; газ–воздух; теплопроводность и плотность воздуха берем при 750 °С. Используя экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи конвекцией и коэффициентам гидравлического сопротивления в насадках [2], получим:

– насадка с квадратными сплошными каналами с ячейкой 45×45 мм с конструктивными параметрами: $f_{уд} = 24,9$ м²/м³, $f_{ж} = 0,28$ м²/м², $d_3 = 0,045$ м

$$\begin{aligned} Re &= \frac{w d_3}{\nu} = \frac{V_{\Sigma} d_3}{f_{ж} F_{нас} \nu} = 1290; \\ E &= \frac{Q}{N} = \frac{\alpha F}{V_{\Sigma} \Delta p} = \frac{\alpha f_{уд} l F_{нас}}{\lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2} V_{\Sigma}} = \\ &= \frac{\alpha f_{уд} l F_{нас}}{\lambda \frac{l}{d} 2 \left(\frac{V_{\Sigma}}{f_{ж} F_{нас}} \right)^2 V_{\Sigma}} = \\ &= \frac{2 \alpha f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\lambda \rho V_{\Sigma}^3} = \\ &= \frac{0,036 \frac{\lambda_l}{0,045} Re^{0,8} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\frac{0,3164}{Re^{0,25}} \rho V_{\Sigma}^3} = \end{aligned}$$

$$= 2,528 \frac{\lambda_l Re^{1,05} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\rho V_{\Sigma}^3} =$$

$$= 39,98 Re^{1,05} = 73784;$$

– насадка НК-2 с конструктивными параметрами $f_{уд} = 29,8$ м²/м³, $f_{ж} = 0,419$ м²/м², $d_3 = 0,055$ м

$$Re = 1054;$$

$$E = \frac{0,1248 \frac{\lambda_l}{0,055} Re^{0,74} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\frac{1,5}{Re^{0,285}} \rho V_{\Sigma}^3} =$$

$$= 1,513 \frac{\lambda_l Re^{1,025} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\rho V_{\Sigma}^3} =$$

$$= 78,375 Re^{1,025} = 98308;$$

– насадка БНИ-12-2 с конструктивными параметрами $f_{уд} = 33,7$ м²/м³, $f_{ж} = 0,335$ м²/м², $d_3 = 0,041$ м,

$$Re = 982,78;$$

$$E = \frac{3,66 \frac{\lambda_l}{0,041} Re^{0,14} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\frac{72,5}{Re} \rho V_{\Sigma}^3} =$$

$$= 1,2313 \frac{\lambda_l Re^{1,14} f_{уд} F_{нас}^3 f_{ж}^2 d_3}{\rho V_{\Sigma}^3} =$$

$$= 34,37 Re^{1,14} = 88629,79.$$

Поверхность теплообмена насадки НК-2 совершеннее с теплогидродинамической точки зрения.

Показатель эффективности может служить для сравнительной оценки эффективности насадок регенеративных теплообменных аппаратов. После анализа необходимо учесть E для второй половины цикла, эффект теплообмена излучением, экономические оценки массогабаритных характеристик и др.

Литература

1. Теплообменные аппараты и системы охлаждения ГТУ и комбинированных установок / В.А. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов. – М.: Изд-во МГТУ, 2004.
2. Определение размеров воздухонагревателей для печей большого объема / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, М.И. Агафонова, Э.А. Певная // *Металлургическая теплотехника (Тематический отраслевой сб. № 1)*. – М.: *Металлургия*, 1972. – С. 132–140.

Торопов Евгений Васильевич – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» Южно-Уральского государственного университета.

Шашкин Владимир Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Южно-Уральского государственного университета.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.314.632

ТИРИСТОРНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ В РЕЖИМАХ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ГЕНЕРИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИЗА АЛЮМИНИЯ

*Ю.И. Хохлов, Н.Ю. Башмакова, М.А. Дзюба
г. Челябинск, ЮУрГУ*

Рассмотрена работа тиристорного выпрямительного агрегата применительно к условиям электролизного производства алюминия в зонах с потреблением и генерированием реактивной мощности. Генерирование реактивной мощности обеспечивается включением компенсирующего устройства на токи пятой и седьмой гармоник.

Электролизное производство алюминиевой промышленности, потребляющее 15 000–17 000 кВт·ч на тонну алюминия, является одним из наиболее энергоемких [1]. Поэтому в условиях строительства новых крупных алюминиевых заводов (Богучанского, Тайшетского, Павлодарского и др.), а также при реконструкции ряда существующих заводов, применением энергосберегающих систем электроснабжения (СЭС) можно получить значительный экономический эффект.

Эффективность использования электрической энергии во многом определяется ее качеством на входе и выходе преобразовательных агрегатов и уровнем потребляемой ими из сети реактивной мощности.

Для технолога электрическая энергия является качественной, если выпрямленный ток достаточно жестко стабилизирован, поскольку от степени стабилизации зависит выход металла по току, а иногда и надежность работы электролизеров. Работа электролизной серии неизбежно сопровождается постоянным появлением анодных эффектов (вспышек) в одной или нескольких ваннах, в результате которых резко возрастает сопротивление «больных» электролизеров. Напряжение на «больных» электролизерах возрастает в среднем с 4–5 до 40–50 вольт, что приводит к снижению выпрямленного тока всей серии и, соответственно, к снижению ее производительности. Указанный отрицательный эффект усиливается при колебаниях напряжения в питающей агрегаты сети переменного тока. От изменений выпрямленного тока технология электролиза должна быть освобождена. Кроме того, технолог заинтересован в полном использовании выпрямительных агрегатов по току и напряжению, поскольку при этом в электролизную серию может быть передана максимальная активная мощность, включено максимальное число

электролизеров, получен максимальный технологический и, соответственно, энергосберегающий эффект.

Для энергетика качество электрической энергии, прежде всего, связано с гармоническим воздействием преобразовательных агрегатов на питающую сеть и с потреблением ими из сети реактивной мощности. Достаточный уровень электромагнитной совместимости агрегатов с питающей сетью должен быть обеспечен при выполнении всех указанных выше условий со стороны технологического процесса. А это предъявляет особые требования к способам регулирования выпрямленного напряжения и компенсации реактивной мощности выпрямительных агрегатов.

В последние годы на ряде предприятий алюминиевой промышленности начато использование тиристорных выпрямительных агрегатов [2]. В этом случае регулирование выпрямленного напряжения агрегатов осуществляется изменением углов управления тиристорных выпрямительных блоков (фазовое управление). При этом обеспечивается необходимая для стабилизации тока плавность регулирования напряжения.

Главным недостатком тиристорных агрегатов является их низкий коэффициент мощности, который снижается до недопустимых для мощных преобразователей величин. Дело в том, что при больших токах нагрузки углы коммутации вентилях неуправляемых выпрямительных агрегатов приближаются к 30 эл. град. А это означает то, что угол сдвига фаз неуправляемого выпрямителя примерно равен 20 эл. град. Агрегат даже при отсутствии управления потребляет из сети реактивную мощность, по величине составляющую (30–40) % от активной мощности. При фазности агрегата большей 12 коэффициент мощности дополнительно снижается из-за появления вынужденных

углов задержки включения вентилях [3]. Резкое влияние на его снижение оказывает процесс фазового управления агрегатами. Последнее, в условиях электролизного производства алюминия, является особенно серьезной проблемой, поскольку в этом случае выпрямительные агрегаты большую часть времени работают в зарегулированном режиме (при пониженном напряжении) и открываются лишь на время анодного эффекта (вспышки) в ваннах. Очевидна необходимость применения устройств компенсации реактивной мощности. Одним из путей компенсации реактивной мощности является перевод выпрямительных агрегатов в компенсированный режим работы [3–8].

Принципиальная схема одного из вариантов тиристорного компенсированного выпрямительного агрегата представлена на рис. 1. Агрегат включает в себя шестифазные преобразовательные блоки 1 и 2 с преобразовательными трансформаторами 3 и 4 и выпрямительными мостами 5 и 6. По отношению к нагрузке выпрямительные мосты могут соединяться как последовательно (рис. 1), так и параллельно. Схематически соединения обмоток трансформаторов 3 и 4 обеспечивается двенадцатифазный режим преобразования. Компенсирующее устройство 7 состоит из трехфазных реакторов 8 и 9 и коммутирующей конденсаторной батареи 10 и может включаться как со стороны сетевых (рис. 1) так и со стороны вентиляльных обмоток трансформаторов. Преобразовательные трансформаторы могут выполняться как на самостоятельных магнитопроводах (рис. 1), так и на одном совмещенном магнитопроводе [4–7].

В пакете MATLAB/SIMULINK разработаны

модели СЭС как с компенсированными, так и с некомпенсированными выпрямительными агрегатами. В качестве примера на рис. 2 приведена модель СЭС с агрегатом по схеме на рис. 1. Модель содержит трехфазный источник напряжения *3-Phase Source 1*, замещающий питающую сеть, аналогичный источник напряжения *3-Phase Source 2*, обеспечивающий питание системы импульсно-фазового управления тиристорными выпрямительными мостами *Universal Bridge 1* и *Universal Bridge 2* с блоками формирования *Synchronized 12-Pulse Generator* и движения *Repeating Sequence* управляющих импульсов. Со стороны сетевых обмоток преобразовательных трансформаторов *Three-phase Transformer 1* и *Three-phase Transformer 2* включена подсистема *Subsystem*, моделирующая компенсирующее устройство. Нагрузка *Load* задана активным и индуктивным сопротивлениями, а также противо-ЭДС. В модели предусмотрено использование блока графического интерфейса *Power-Continuous* и показанной на рис. 2 измерительной аппаратуры. Параметры СЭС отвечают реальному комплексу электролиза с линейным напряжением питающей сети 10 кВ и номинальными выпрямленным током 25 000 А и напряжением 850 В.

С помощью разработанных моделей проведены исследования статических, динамических и спектральных характеристик СЭС с тиристорными выпрямительными агрегатами. Ниже демонстрируются возможности рассматриваемых преобразователей при работе их в некомпенсированном и компенсированном режимах работы применительно к условиям электролиза алюминия.

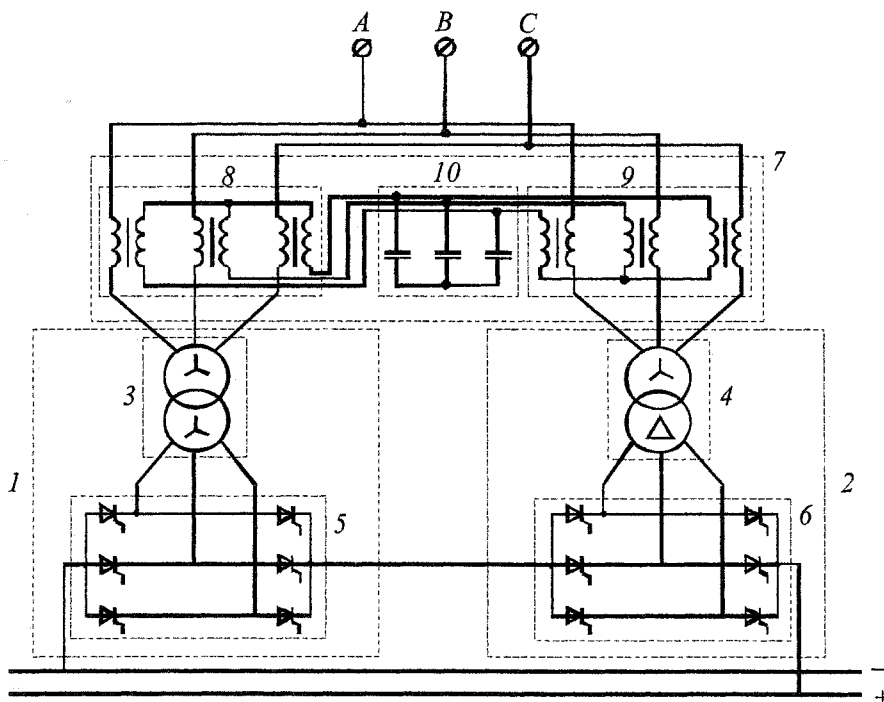


Рис. 1. Принципиальная схема компенсированного выпрямительного агрегата

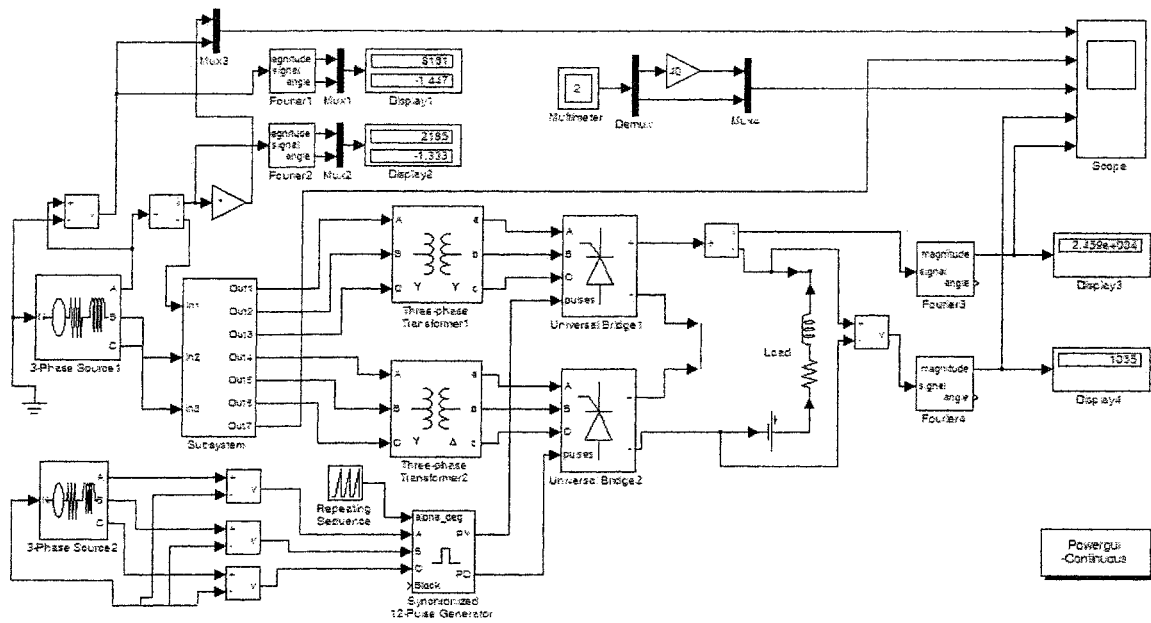


Рис. 2. Модель комплекса «питающая сеть–тиристорный компенсированный выпрямительный агрегат–нагрузка»

Временными диаграммами на рис. 3 иллюстрируется процесс управления некомпенсированным выпрямительным агрегатом. Аналогичный процесс в СЭС с компенсированным преобразователем показан на рис. 4. Следует заметить, что для стабилизации тока в электролизерах при возникновении анодных эффектов и колебаниях напряжения питающей сети в условиях алюминиевой промышленности требуемый диапазон плавного регулирования выпрямленного напряжения состояния лишь 5–7% от номинального напряжения. Временные диаграммы подтверждают возможность успешной работы агрегатов как в некомпенсированном, так и в компенсированном режимах работы, поскольку, как видно из кривых напряжения на нагрузке на рис. 3 и 4, этот диапазон перекрывается с запасом более чем в два раза.

Кривые фазного напряжения и тока питающей сети указывают на то, что некомпенсированный агрегат работает в зоне с потреблением, а компенсированный – в зоне с генерированием реактивной мощности. Режим генерирования реактивной мощности требует применения компенсирующего устройства. В данном преобразователе оно работает с высокой эффективностью [4] на частотах пятой и седьмой гармоник (см. кривые тока и напряжения на конденсаторной батарее на рис. 4). Кроме того, из-за возрастания обратного напряжения на тиристорах, по сравнению с некомпенсированным агрегатом, требуется их более высокий класс (см. кривые тока и напряжения на тиристорах на рис. 3 и 4). Однако указанные затраты могут быстро окупиться за счет большой величины генерируемой реактивной мощности. Действительно, если учесть, что компенсирующее

устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности некомпенсированного агрегата и ее генерирование компенсированным агрегатом, то нетрудно убедиться в том, что величина реактивной мощности даже превышает активную мощность нагрузки.

Необходимо обратить внимание на то, что номинальный режим работы у компенсированного агрегата обеспечивается в его открытом состоянии и лишь при возникновении анодных эффектов или соответствующего изменения напряжения питающей сети агрегат переходит в зарегулированный режим. А это означает, что компенсированный агрегат продолжительное время работает в выбранном оптимальном режиме с генерированием максимального значения реактивной мощности. В некомпенсированном агрегате имеет место обратная картина. В номинальном режиме некомпенсированный агрегат работает с максимальным потреблением реактивной мощности, которая снижается лишь на время указанных отклонений от номинальных параметров сети и нагрузки.

На рис. 5 приведены спектры и коэффициенты искажения синусоидальности напряжения и тока питающей сети зарегулированного некомпенсированного выпрямительного агрегата. Аналогичные характеристики для открытого компенсированного агрегата приведены на рис. 6. Характеристики определены на одном и том же периоде изменения напряжения сети, отвечающем наиболее продолжительному номинальному режиму работы электролизной серии.

Из рассмотрения результатов расчета на рис. 5 и 6 следует, что в обоих случаях спектры тока и напряжения сети соответствуют классическому

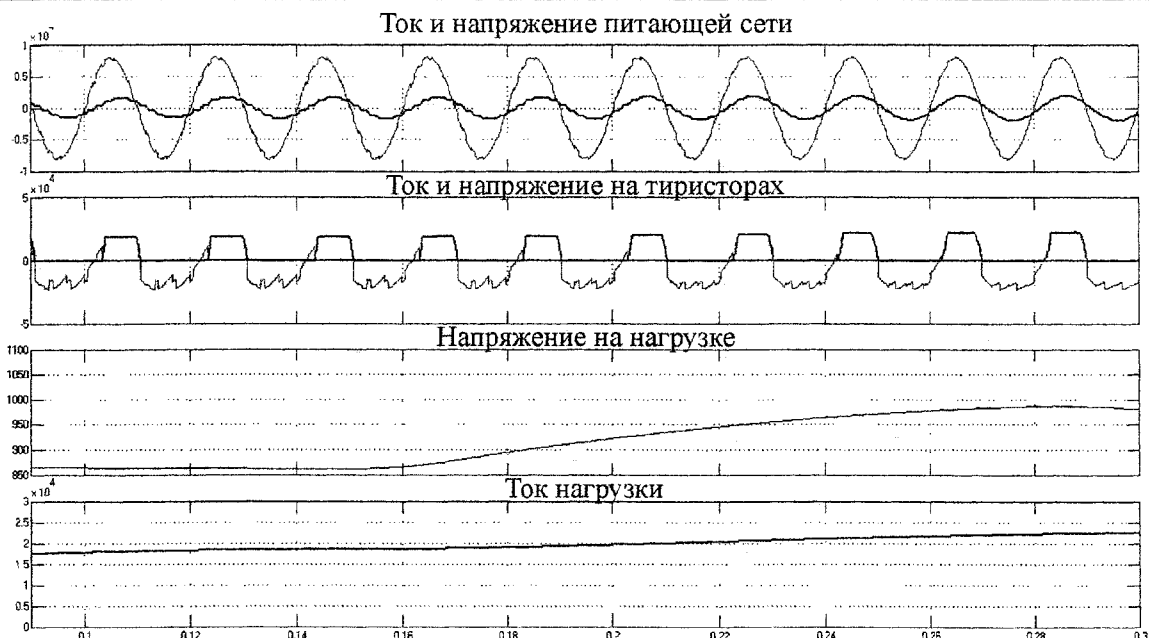


Рис. 3. Временные диаграммы процессов в комплексе с тиристорным некомпенсированным выпрямительным агрегатом

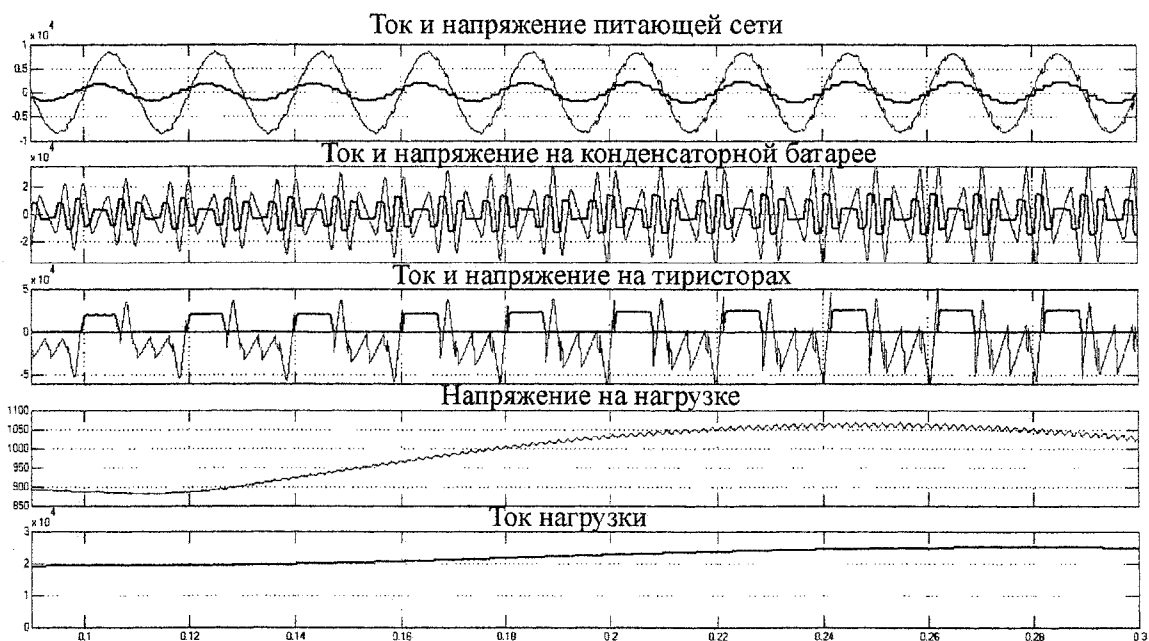


Рис. 4. Временные диаграммы процессов в комплексе с тиристорным компенсированным выпрямительным агрегатом

двенадцатифазному режиму преобразования. Сопоставление коэффициентов искажения синусоидальности указанных величин говорит о том, что в номинальном режиме работы серии некоторое преимущество имеют СЭС с компенсированными выпрямительными агрегатами. Аналогичный анализ для режима максимального выпрямленного напряжения приводит к противоположному результату, но этот режим непродолжителен.

Таким образом, применение тиристорных компенсированных выпрямительных агрегатов

является эффективным средством компенсации реактивной мощности при выполнении всех других основных требований к СЭС электролизного производства алюминия. В зависимости от требования питающей сети по реактивной мощности компенсированные агрегаты целесообразно применять с тем или иным числом некомпенсированных преобразователей. В этом случае оптимизируется потребление или генерирование реактивной мощности и дополнительно снижается уровень несинусоидальности напряжения и тока сети. По-

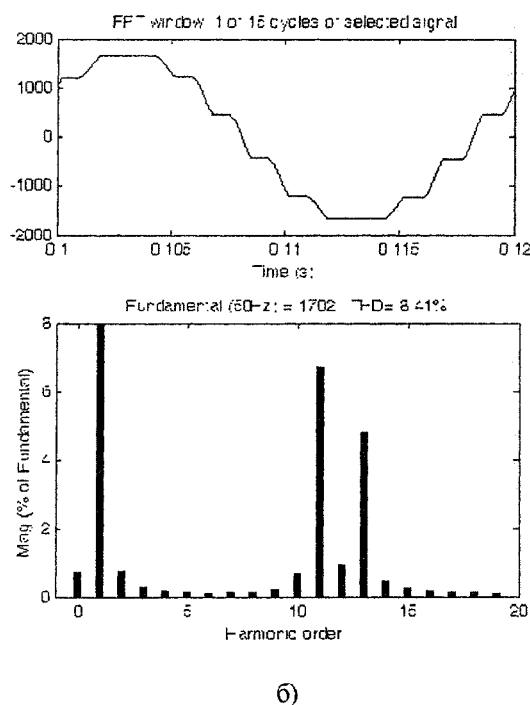
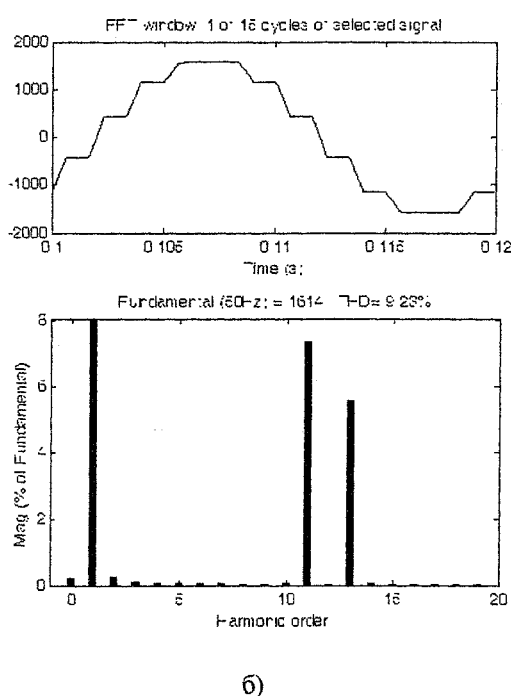
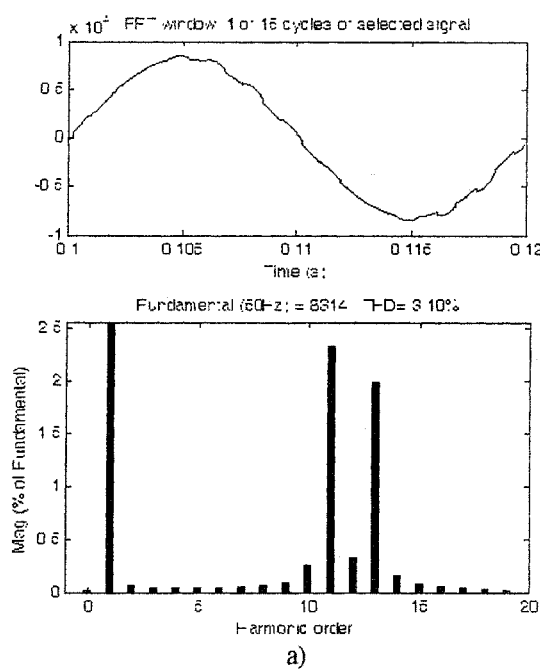
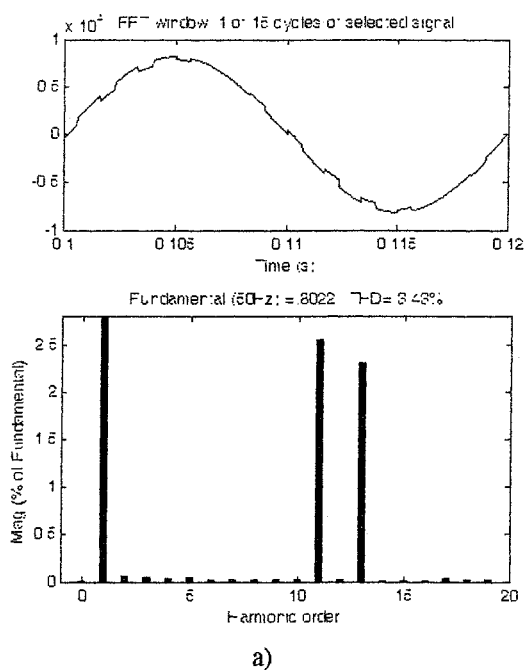


Рис. 5. Спектры напряжения (а) и (б) питающей сети некомпенсированного выпрямителя

Рис. 6. Спектры напряжения (а) и (б) питающей сети компенсированного выпрямителя

следнее связано с тем, что компенсированные агрегаты при параллельной работе с некомпенсированными играют роль активных фильтров [4, 5]. В результате СЭС работает в режиме, близком к двадцатичетырехфазному.

В заключение отметим, что временные диаграммы на рис. 3 и 4 отвечают неизменным параметрам нагрузки ($R_n = 0,03$ Ом, $L_n = 0,001$ Гн, $e_n = 300$ В). В этом случае при повышении выпрямленного напряжения возрастает и выпрямленный ток. Это сопровождается повышением на-

пряжения на конденсаторной батарее и вентилях. В замкнутой системе автоматической стабилизации выпрямленного тока указанные напряжения снижаются.

Литература

1. Бохмат, И.С. *Алюминиевая промышленность и электроэнергетика: реальность и перспективы* / И.С. Бохмат // *Электрика*. – 2004. – № 8. – С. 3–13.

2. Бобков, В.А. Реконструкция преобразовательных подстанций для питания электролизеров алюминия / В.А. Бобков, А.В. Бобков // Силовая электроника. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». – СПб.: Издательство ООО «Издательство Файнстрит». – 2006. – №4. – С. 66–68.

3. Хохлов Ю.И. Квазиустановившиеся электромагнитные процессы и характеристики двадцатичетырехфазного компенсированного преобразователя / Ю.И. Хохлов, В.О. Розкин // Электричество. – 1990. – № 10. – С. 48–54.

4. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1995. – 355 с.

5. Хохлов Ю.И. Проблемы энергосбережения

в системах электроснабжения на основе энергетической электроники / Ю.И.Хохлов // Наука и технологии. Труды XXIII Российской школы по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2003. – С. 555–570.

6. Патент 1124414 (Российская Федерация). Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов. – Бюл. изобр. – 1984. – № 42.

7. Результаты промышленных испытаний первого компенсированного выпрямительного агрегата с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах / Ю.И. Хохлов, И.Л. Красногорцев, С.Г. Ляпкало и др. // Электричество, 1989. – № 3. – С. 26–31

8. Хохлов Ю.И. Компенсированные параметрические источники тока и их свойства // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 26–31.

Хохлов Ю.И. в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет). В 1991 году в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию на тему «Компенсированный выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков». Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» ЮУрГУ, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АЭН РФ.

Башмакова Н.Ю. в 1996 году окончила Челябинский государственный технический университет (ныне Южно-Уральский государственный университет) по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий». Ассистент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ. Направление научной деятельности – силовая электроника.

Дзюба М.А. в 1997 году окончил Челябинский государственный технический университет (ныне Южно-Уральский государственный университет). В 2004 году в Южно-Уральском государственном университете защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование электромагнитных процессов в компенсированном преобразователе частоты». Доцент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ, кандидат технических наук.

ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ДРОССЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю.И. Хохлов, В.В. Прохоров
г. Челябинск, ЮУрГУ

Исследуется один из вариантов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением.

Потребление электрической энергии в ряде энергоемких отраслей промышленности осуществляется на постоянном токе с использованием полупроводниковых диодных преобразователей. При этом объекты электротехнологии и транспорта требуют оснащения выпрямительных агрегатов системами автоматического или ручного регулирования электрического режима. Но применение управляемых вентилях (тиристоров) зачастую нецелесообразно ввиду больших величин преобразуемой мощности. Вместе с тем существует эффективный способ управления диодными выпрямителями – дроссельное регулирование [1–4]. Оно, также как и тиристорное, с целью предотвращения резкого снижения энергетических показателей осуществляется в пределах одной ступени дискретного трансформаторного регулирования. Несмотря на то, что дроссельный способ управления не лишен определенных недостатков, существуют пути их преодоления [4–7].

В статье рассматривается один из способов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением на примере трехфазной мостовой схемы, представленной на рис. 1. Она основана на трех дросселях насыщения ДН1–ДН3, рабочие обмотки которых включены последовательно во вторичные фазные цепи трансформатора. Обмотки управления под-

ключены к тиристорному мосту $VS1–VS6$, замкнутому накоротко, а также к шинам выпрямленного напряжения U_d через дополнительный выпрямительный мост на вентилях $VD7–VD12$ (показан пунктиром). Обмотки смещения у ДН отсутствуют.

Работает схема следующим образом. При появлении положительного напряжения на соединенных последовательно рабочей обмотке ДН и вентиле основного моста $VD1–VD6$ последний открывается и дроссель начинает выводиться из ненасыщенного состояния. В это время ток через его рабочую обмотку изменяется пренебрежимо мало, и все напряжение вентильного плеча оказывается приложенным к ней. На этом этапе ДН представляет собой трансформатор напряжения, поэтому напряжение рабочей обмотки трансформируется в обмотку управления с коэффициентом $k_{дн} = W_{оу} / W_{ор} > 1$. В момент времени, когда напряжение на соответствующем вентиле дополнительного моста $VD7–VD12$ становится положительным, он открывается и начинается процесс коммутации.

Таким образом, введение в схему дополнительного диодного моста $VD7–VD12$ позволяет процессу коммутации начаться не после насыщения ДН, а раньше, что приводит к уменьшению угла сдвига первой гармоники фазного тока трансформатора и, следовательно, к увеличению $\cos \phi$ агрегата.

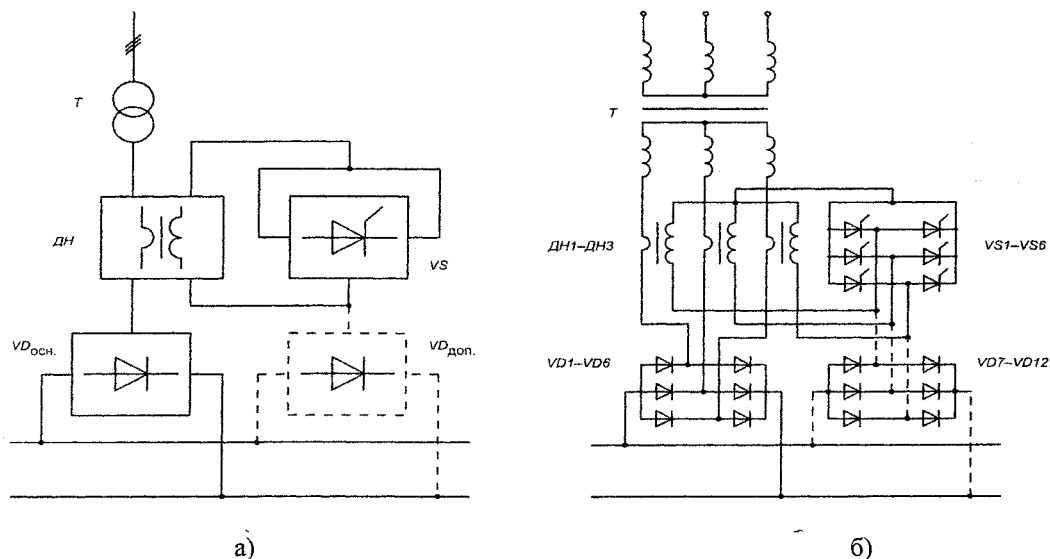


Рис. 1

Длительность процесса выведения дросселей определяет угол дроссельного управления, а следовательно, и величину выпрямленного напряжения U_d . Оперативное изменение этого угла осуществляется открыванием в нужные моменты времени тиристоров $VS1-VS6$ [4–6], в результате чего ДН переводятся в режим трансформаторов тока и перестают оказывать влияние на цепи основных вентилях. Задержка моментов открывания тиристоров относительно точек пересечения фазных ЭДС определяет углом тиристорного управления α_t схемы. За период питающего напряжения происходит два перемагничивания сердечников ДН.

В ходе анализа работы схемы была создана ее аналитическая модель, описывающая процессы в схеме в зависимости от соотношений углов α_t , γ_1 , γ_2 . На рис. 2 для примера показаны кривые фазного тока трансформатора и напряжения на нагрузке, полученные в результате просчета аналитической модели в программе Mathcad.

Помимо этого создана модель для численного исследования схемы в программе Matlab, изображенная на рис. 3. Формы токов и напряжений приведены для сравнения в обычном варианте (без дополнительных вентилях $VD7-VD12$) – рис. 4, а и при наличии таковых – рис. 4, б. Спектры фазного тока трансформатора показаны на рис. 5.

Видно, что включение дополнительного диодного моста оказывает положительное влияние на коэффициент сдвига, уровень гармоник фазного тока и уровень пульсаций выпрямленного напряжения.

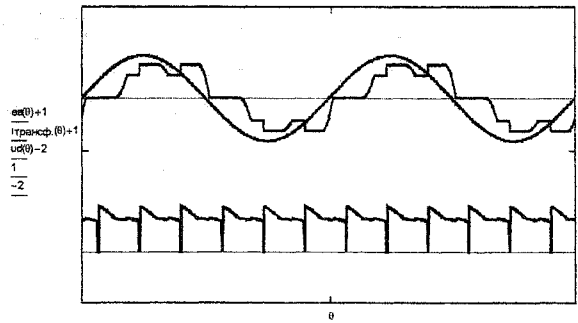


Рис. 2

Примеры осциллограмм, снятых в процессе физического моделирования работы схемы, показаны на рис. 6. Здесь цифрами обозначены: 1 – фазная ЭДС трансформатора, 2 – фазный ток трансформатора, 3 – напряжение на дросселе насыщения, 4 – напряжение на основном вентиле, 5 – ток дополнительного вентиля, 6 – напряжение на дополнительном вентиле.

По результатам экспериментального исследования построен ряд характеристик. Так, на рис. 7, б показана область существования внешних характеристик исследуемой схемы в максимальном для нее диапазоне регулирования в сравнении с характеристиками схемы без дополнительных вентилях в этом же диапазоне регулирования (рис. 7, а). При угле $\alpha_t = 0$ характеристики совпадают, а с увеличением угла управления ее жесткость у рассматриваемой схемы увеличивается. При этом глубина регулирования выпрямленного напряжения

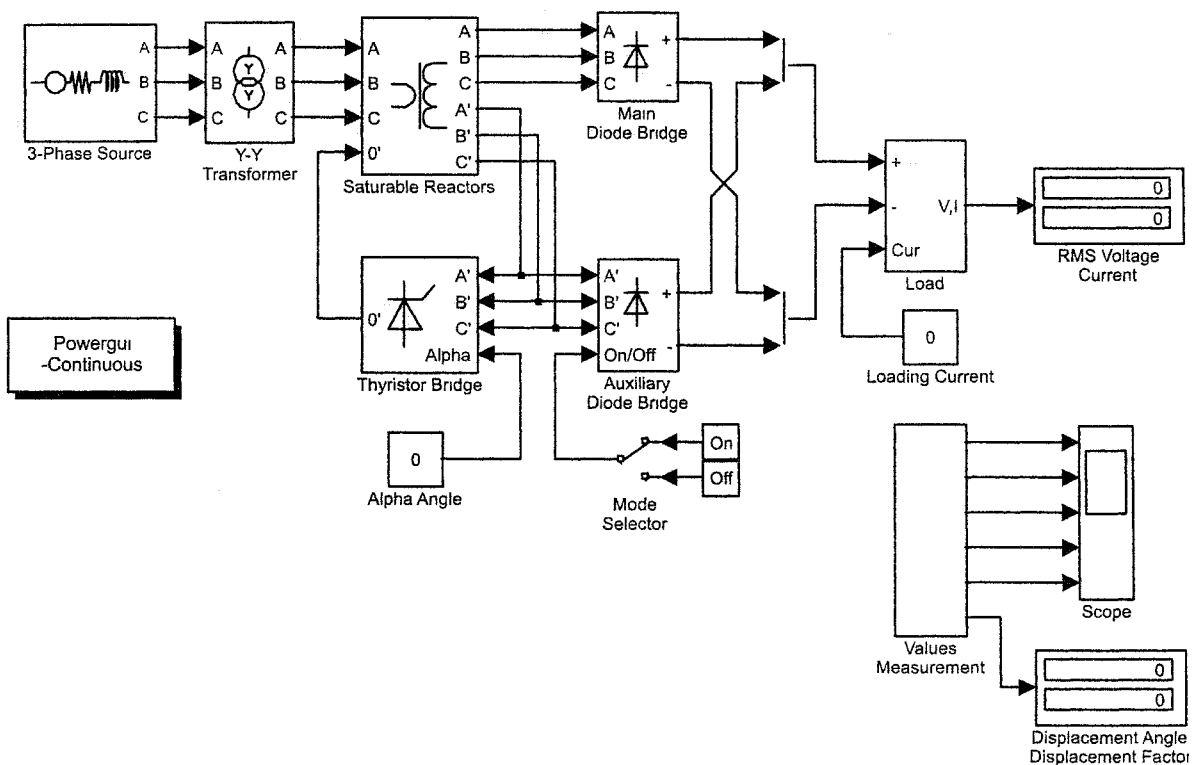


Рис. 3

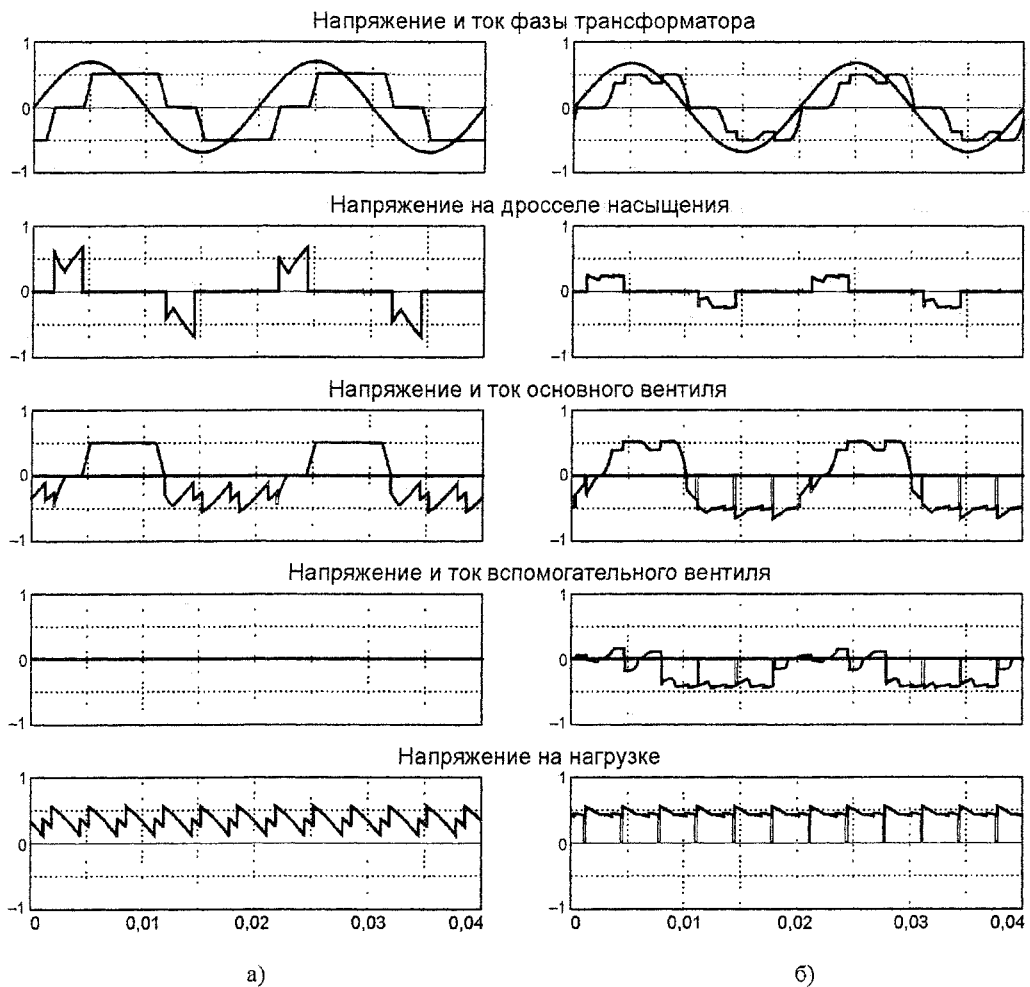


Рис. 4

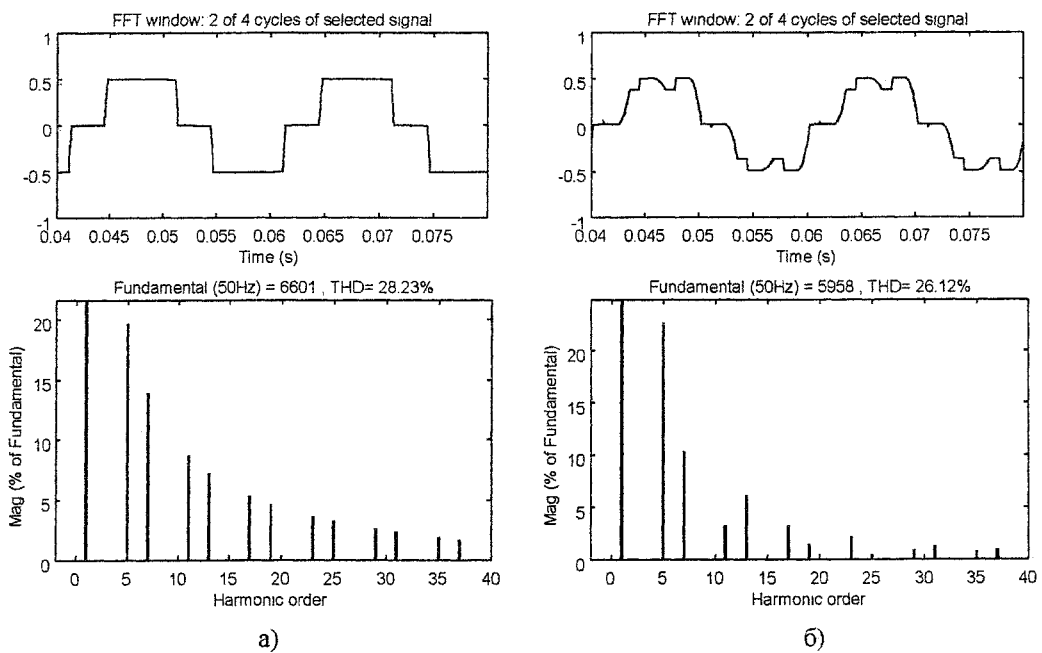
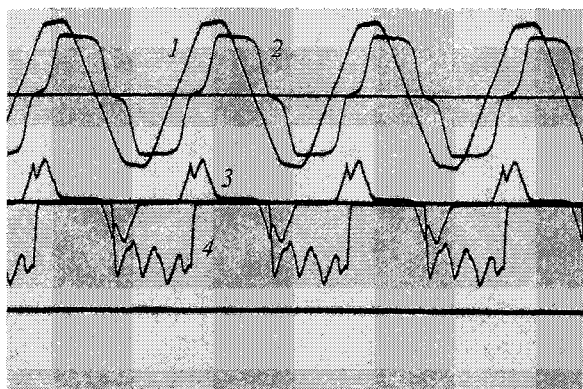


Рис. 5

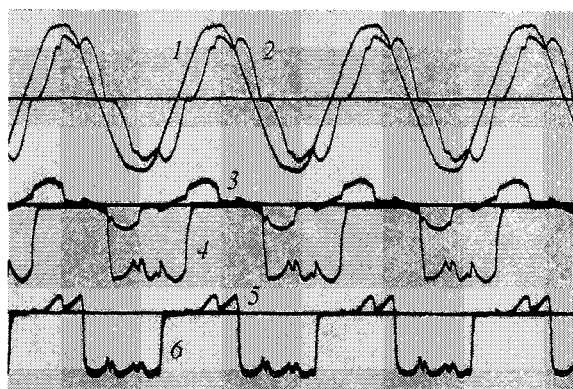
$$\Delta U_d^* = \frac{U_{d \max} - U_{d \min}}{U_{d \max}}$$

несколько меньше, чем в варианте без дополнительного моста (рис. 8 а, б).

Энергетические характеристики рассматриваемой схемы существенно лучше, чем у аналогичной без дополнительного выпрямительного моста (рис. 9 а, б, показаны при одинаковом диапазоне регулирования выпрямленного напряжения,

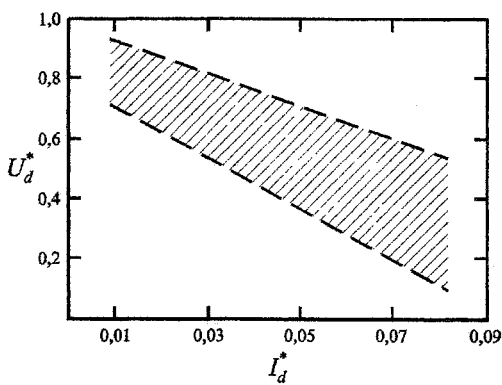


а)

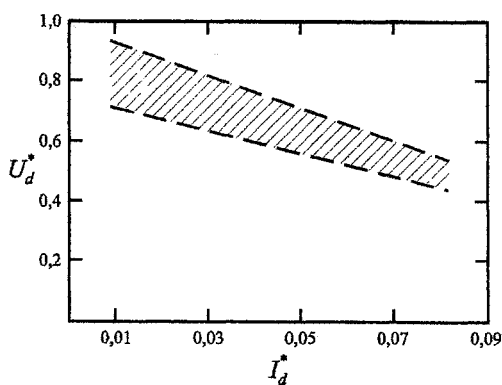


б)

Рис. 6

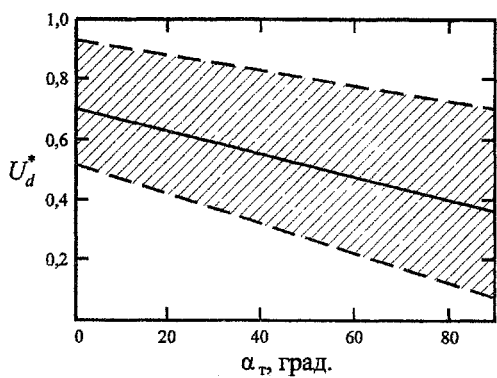


а)

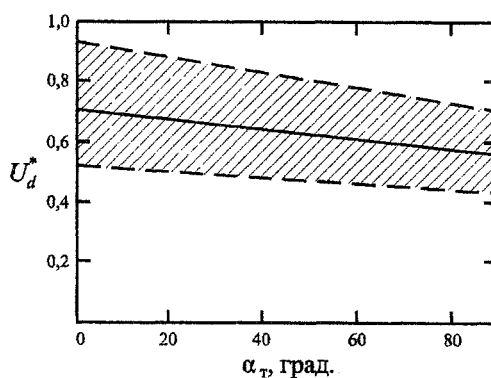


б)

Рис. 7

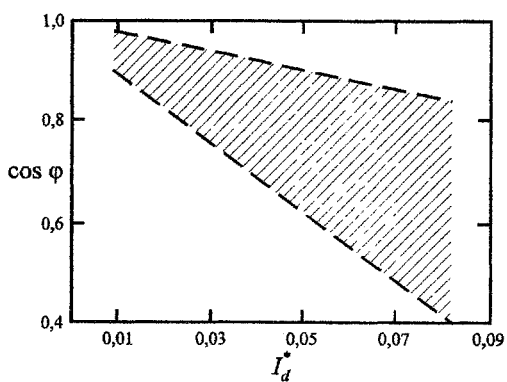


а)

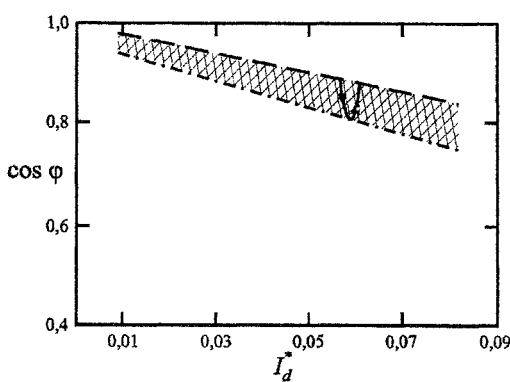


б)

Рис. 8



а)



б)

Рис. 9

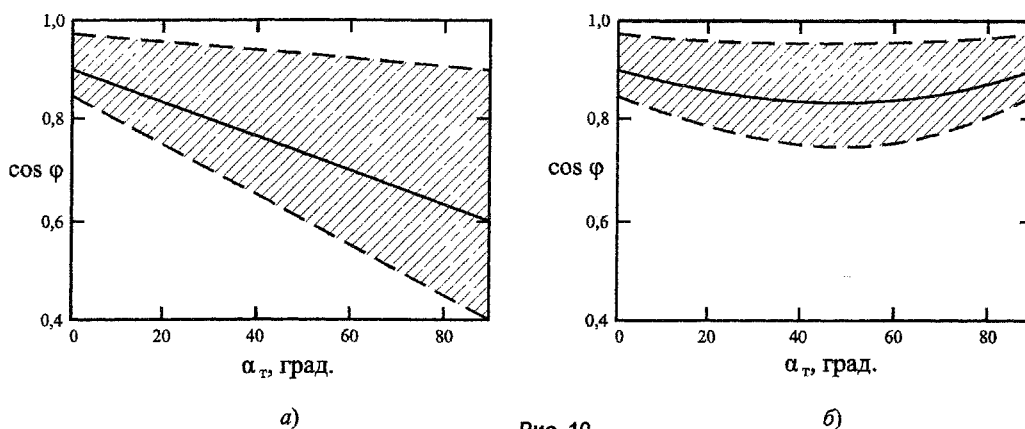


Рис. 10

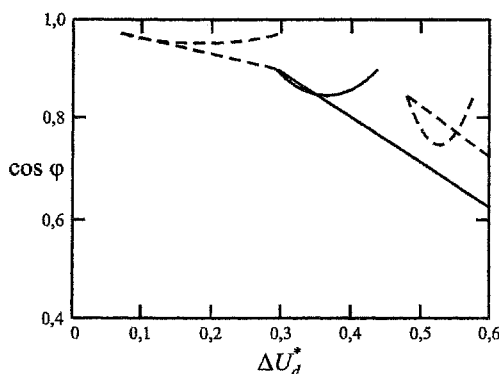


Рис. 11

максимально возможном для схемы с дополнительным мостом, стрелкой показано направление перемещения характеристики при увеличении угла управления). С увеличением угла управления α_t величина коэффициента сдвига первой гармоники тока $\cos \phi$ схемы с дополнительным мостом ухудшается медленнее, а после $\alpha_t = 60^\circ$ начинает возрастать (рис. 10).

Зависимости коэффициента сдвига от глубины регулирования приведены на рис. 11. Здесь прямые линии соответствуют схеме без дополнительного моста, поднимающиеся вверх – исследуемой схеме.

На рис. 8, 10, 11 сплошной линией показаны соответствующие характеристики для номинального значения тока I_d .

Необходимо отметить, что некоторое отличие характеристик на рис. 7–10а в относительных единицах от канонической формы обусловлено небольшой (порядка единиц киловатт) мощностью испытательного стенда, значительной величиной потоков рассеяния трансформатора, а также сравнительно большим активным сопротивлением нагрузки. Тем не менее, проведенные исследования позволяют однозначно оценить качественный характер процессов в рассматриваемой схеме.

При пересчете в относительные единицы в качестве базовых взяты

$$U_{\text{б}} = \frac{3}{\pi} E_{2лм}, \quad I_{\text{б}} = \frac{E_{2лм}}{x_k},$$

где $E_{2лм}$ – амплитуда линейной ЭДС трансформатора,

x_k – индуктивное сопротивление контура коммутации.

Все зависимости получены при $k_{\text{дн}} = 3$. Увеличение этого коэффициента улучшает энергетические характеристики схемы, но снижает глубину регулирования выпрямленного напряжения, которая без учета коммутации определяется выражением

$$\Delta U_d^* = \frac{1}{k_{\text{дн}} + 1}.$$

Анализ результатов моделирования и экспериментального исследования позволяет заключить, что введение в схему дополнительного выпрямительного моста на диодах VD7–VD12 обеспечивает улучшение коэффициента сдвига первой гармоники тока $\cos \phi$, но сопровождается сужением диапазона регулирования выпрямленного напряжения ΔU_d .

Литература

1. Толстов, Ю.Г. Силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения / Ю.Г. Толстов, Г.П. Мосткова, Ф.И. Ковалев. – М.: Наука, 1968. – 260 с
2. Мосткова, Г.П. Сравнение схем включения дросселей насыщения при использовании их для управления трехфазным полупроводниковым полупроводниковым выпрямителем / Г.П. Мосткова, Ф.И. Ковалев // Электромеханика. – 1962. – № 5.
3. Хохлов, Ю.И. Режимы работы компенсированных полупроводниковых выпрямителей /

Ю.И. Хохлов, А.В. Баев // *Промышленная энергетика, с комбинированным способом регулирования напряжения.* – 1974. – № 8. С. 16–20.

4. Хохлов, Ю.И. *Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы. нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов.* – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.

5. Пат. 1781793 (РФ) *Управляемый выпрямитель / Ю.И. Хохлов.* – Бюл. изобр., 1992, № 46.

6. Хохлов, Ю.И. *Способы дроссельного управления полупроводниковыми выпрямительными агрегатами / Ю.И. Хохлов, В.В. Прохоров // Промышленная энергетика.* – 2000. – № 5. – С. 47–49

7 Бобков, А.В. *Управляемый выпрямитель с фазоступенчатым регулированием. выпрямленного напряжения для питания электролизеров / А.В. Бобков, В.А. Бобков, В.С. Копырин // Промышленная энергетика.* – 2000. – № 6. – С. 42–45.

Хохлов Юрий Иванович в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт. В 1991 году защитил докторскую диссертацию. Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой систем электроснабжения, директор центра энергосбережения ЮУрГУ, профессор, член-корреспондент АЭН РФ. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения.

Прохоров Владилен Владиленович в 1995 году окончил Челябинский государственный технический университет, в 2001 – аспирантуру ЮУрГУ. Старший преподаватель кафедры систем электроснабжения. Направление научной деятельности – силовая электроника.

КОМПЛЕКСНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина
г. Челябинск, ЮУрГУ*

Рассматривается автоматизированный лабораторный комплекс для изучения полупроводниковых приборов, интегральных схем и устройств преобразовательной техники, основанный на сочетании физического и виртуального моделирования. Приведен перечень исследуемых полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и преобразователей. Исследуются вольтамперные характеристики приборов, а также внешние, регулировочные и энергетические характеристики преобразователей. Имеется возможность функционирования стенда в ручном и автоматизированном режиме.

В работе [1] дан анализ тенденций развития лабораторных стендов по электротехнике и электронике. В соответствии с этим стенд, обеспечивающий изучение достаточно сложных устройств, выполняется в виде отдельных модулей, содержащих законченную схему с переключениями для расширения функциональных возможностей. Модульность обеспечивает возможность развития стенда, а, следовательно, отодвигает время его морального старения.

В настоящее время имеется тенденция миниатюризации лабораторного оборудования. Это обеспечивает экономию материальных и энергетических ресурсов, снижает требуемые площади. Непрерывно расширяющийся круг устройств преобразовательной техники требует создания новых модулей. Малая мощность лабораторных стендов, принятая из условий экономии ресурсов, площадей и энергии, делает невозможным полное соответствие исследуемых процессов электромагнитным процессам в мощных преобразователях. Особые трудности вызывает исследование аварийных режимов.

Виртуальное моделирование позволяет устранить эти недостатки и исследовать особенности процессов в мощных преобразователях. Виртуальные модели оказываются значительно дешевле по сравнению с физическими. Их структура легко изменяется, а это особенно важно в условиях быстрого развития современных систем. Существенным недостатком виртуального моделирования является то, что нет «эффекта присутствия» очень важного при формировании будущего специалиста.

При разработке автоматизированного лабораторного комплекса были совмещены возможности физического и виртуального моделирования на одном рабочем месте. Этапу автоматизированного исследования предшествует этап «ручного» с традиционным построением характеристик по точкам. Автоматизация проведения экспериментов на физических моделях сокращает время их проведе-

ния, а следовательно, увеличивает возможный объем проводимых исследований.

Применение виртуальных моделей позволяет расширить возможности изменения параметров, включая выход на аварийные режимы, что весьма затруднительно и небезопасно на физических моделях. Совмещение математического (виртуального) и физического моделирования позволяет просто решать вопросы адекватности.

Виртуальное моделирование осуществляется с помощью пакета программ MatLab+Simulink.

Автоматизированный стенд (рис. 1) обеспечивает исследование следующих полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и вентильных преобразователей:

- выпрямительных диодов, стабилитронов, светодиодов;
- биполярных, полевых и IGBT транзисторов;
- операционных усилителей и схем их включения;
- комбинационных и последовательностных цифровых интегральных микросхем;
- асимметричных, симметричных и запираемых тиристоров;
- однофазных неуправляемых выпрямителей;
- однофазного управляемого выпрямителя;
- трехфазных управляемых выпрямителей;
- ведомых инверторов;
- двухкомплектного реверсивного преобразователя;
- преобразователя и импульсного стабилизатора постоянного напряжения;
- автономного инвертора напряжения;
- двухзвенного преобразователя частоты;
- тиристорного преобразователя переменного напряжения;
- источника вторичного электропитания;
- корректора коэффициента мощности.

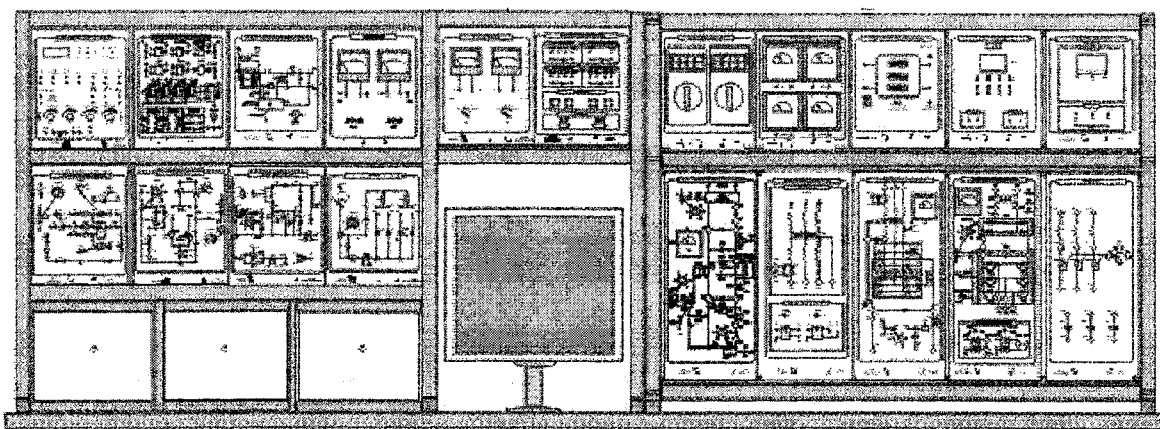


Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса по физическим основам электроники и преобразовательной технике

Содержание работ соответствует материалу, изложенному в [2]. В стенде используются как реальные, так и виртуальные приборы.

Программное обеспечение лабораторного стенда расширяет возможности измерительных приборов, а также обеспечивает функции управления для автоматизации проведения экспериментов. Существующие измерительные приборы широкого применения не обеспечивают достаточной точности при измерении несинусоидальных токов и напряжений, достигающих весьма низких частот (5 Гц) и содержащих широкий спектр гармоник. Поэтому разработанная информационно-измерительная система, созданная на базе персонального компьютера, решает не только задачу удобного представления информации, но и позволяет проводить измерения при сложной форме сигналов. Она обеспечивает работу с мгновенными, средними и действующими значениями сигналов, измеряет величины токов, напряжений, активных, реактивных и полных мощностей, КПД, коэффициент мощности, $\cos \phi$, коэффициент несинусоидальности и др.

Аппаратная часть информационно-измерительной системы содержит датчики тока и напряжения, основанные на эффекте Холла, с переключаемой полосой пропускания, модуль ввода-вывода с установленными в нем входными диффе-

ренциальными усилителями и выходными усилителями мощности с потенциальной развязкой и персональный компьютер. В качестве устройства связи с объектом (УСО) применена плата L-780M, обеспечивающая запись и просмотр мгновенных значений сигналов в течение заданного интервала времени с высокой частотой дискретизации (100 000 точек в секунду при осциллографировании четырех аналоговых сигналов).

С целью экспериментального исследования разработанных модулей стенда и всего автоматизированного информационно-измерительного комплекса были сняты вольт-амперные, регулировочные, внешние и энергетические характеристики, а также временные диаграммы сигналов исследуемых объектов. Функциональная схема эксперимента представлена на рис. 2.

Она состоит из системы управления и информационно-измерительной системы, представляющих собой программное обеспечение (ПО) [3]; платы L-780M, обеспечивающей преобразование аналоговых сигналов, поступающих с модуля «Ввод-вывод», в цифровую форму для персонального компьютера (ПК) и обратное преобразование; модуль «Ввод-вывод», предназначенный для гальванической развязки и согласования уровней входных и выходных сигналов между платой L-780M и внешними исследуемыми модулями.

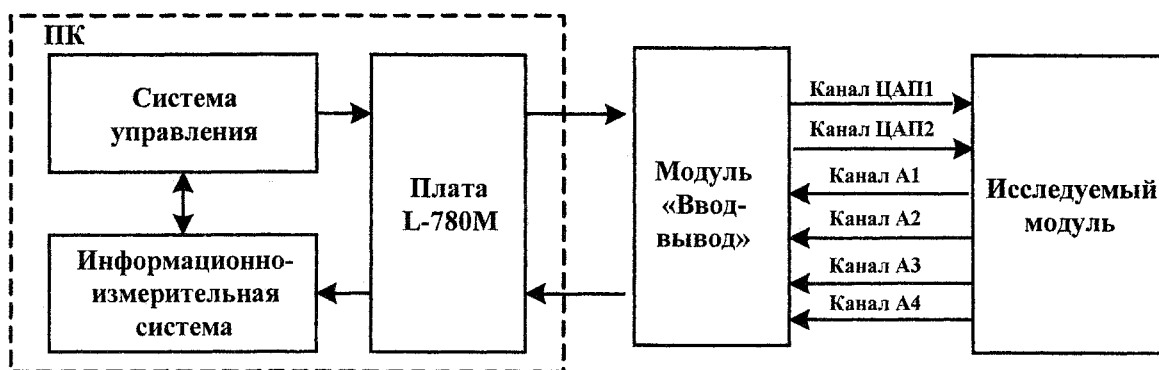


Рис. 2. Функциональная схема эксперимента

Регулировочные и энергетические характеристики исследуемых модулей были сняты в ручном и автоматическом режиме. С этой целью в системе управления программным путем было сформировано управляющее воздействие в цифровой форме по закону ступенчатой функции (рис. 3). Уровни $N_1, N_2 \dots N_n$, длительности $t_1, t_2 \dots t_n$ и количество дискретно изменяющихся ступенек управляющего воздействия выбиралось из условия конкретного эксперимента. При помощи платы L-780M цифровой управляющий сигнал преобразуется в аналоговый и через модуль «Ввод-вывод» поступает на управляющий вход исследуемого модуля (см. рис. 2).

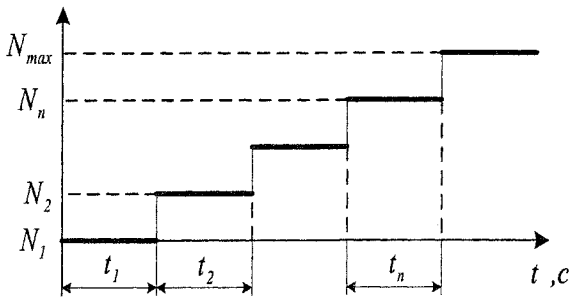


Рис. 3. Ступенчатый сигнал управления

Измерение средних и действующих напряжений, а также токов производилось информационно-измерительной системой. С этой целью измеряемые сигналы с выходов исследуемых модулей через датчики напряжения и тока или непосредственно (в низковольтных схемах) были подключены к модулю «Ввод-вывод».

Во время эксперимента измеряемые значения напряжений, токов, мощностей отображались на экране дисплея в окне виртуального измерительного прибора (рис. 4) с учетом масштабного коэффициента измерительных датчиков и цепей модуля «Ввод-вывод».

Регистрация входных сигналов и построение зависимостей между значениями входных (выходных) сигналов осуществлялось при помощи «Регистратора сигналов», который входит в состав ПО информационно-измерительной системы. По

окончании эксперимента (после останова регистратора) загружается окно «Просмотр измерений», которое отображает снятую экспериментальную зависимость. Кнопка «Сохранить как ...» в окне просмотра измерений позволяет сохранить полученные результаты в файл с расширением .dat для программы Mathcad или с расширением .xls для программы Excel.

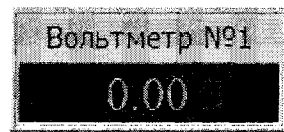


Рис. 4. Окно виртуального измерительного прибора

Экспериментальные характеристики были построены с использованием программы Microsoft Excel. Временные диаграммы сигналов были записаны при помощи программы L-Graph, входящей в состав базового программного обеспечения платы L-780M.

Ниже приведены некоторые результаты, полученные при испытании модулей.

На рис. 5, а приведены регулировочные характеристики для трехфазной мостовой и трехфазной нулевой схем, снятые в автоматическом режиме, а на рис. 5, б приведены внешние характеристики трехфазной мостовой схемы, снятые при работе информационно-измерительной системы, но с «ручным» изменением нагрузки.

На рис. 6, а приведена регулировочная характеристика преобразователя постоянного напряжения, снятая в автоматическом режиме, а на рисунке 6, б внешние характеристики преобразователя постоянного напряжения, снятые при работе информационно-измерительной системы, но с «ручным» изменением нагрузки.

На рис. 7, а приведены зависимости напряжения на выходе импульсного стабилизатора постоянного напряжения от напряжения источника питания $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{ип}})$, снятые в автоматическом режиме, а на рис. 7, б приведены внешние характеристики импульсного стабилизатора по-

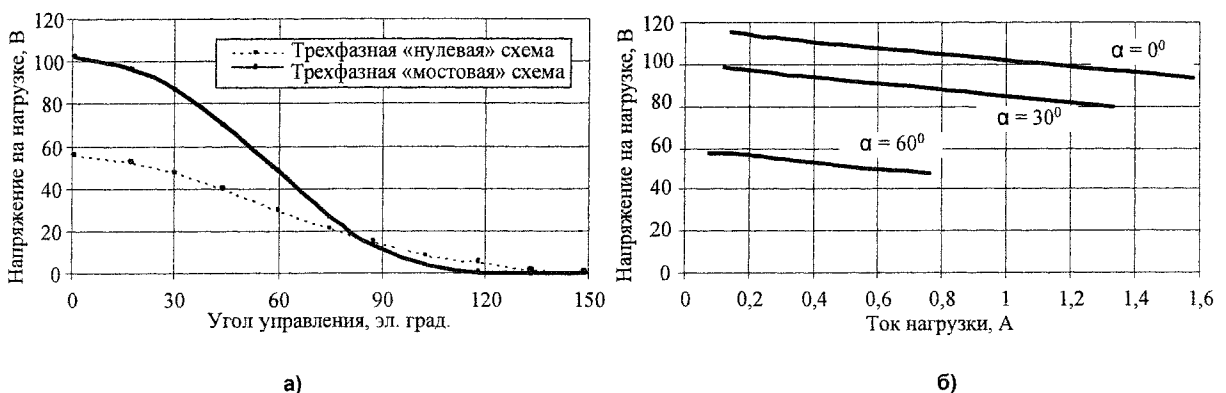


Рис. 5. Экспериментальные регулировочные и внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей тока

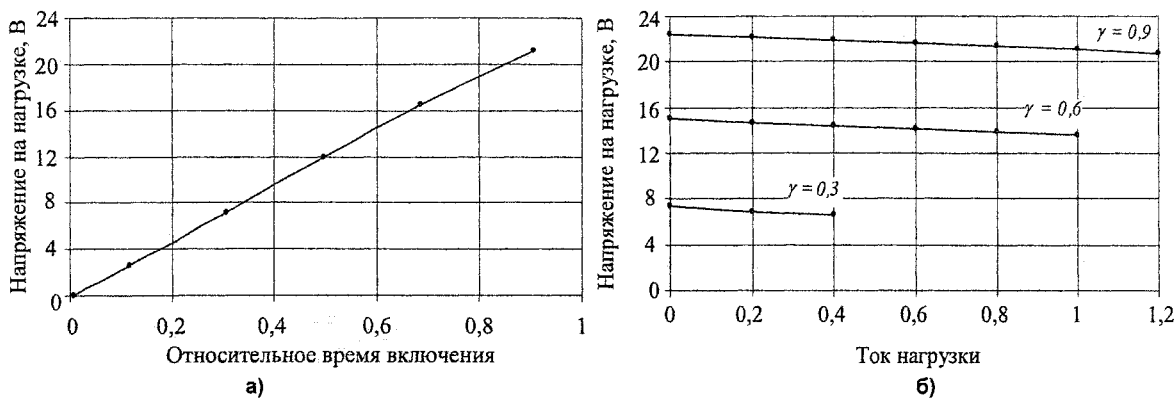


Рис. 6. Экспериментальные характеристики преобразователя постоянного напряжения: а) регулировочная; б) внешние ($U_{ИП} = 25 \text{ В}$, $f_{ШИМ} = 10 \text{ кГц}$)

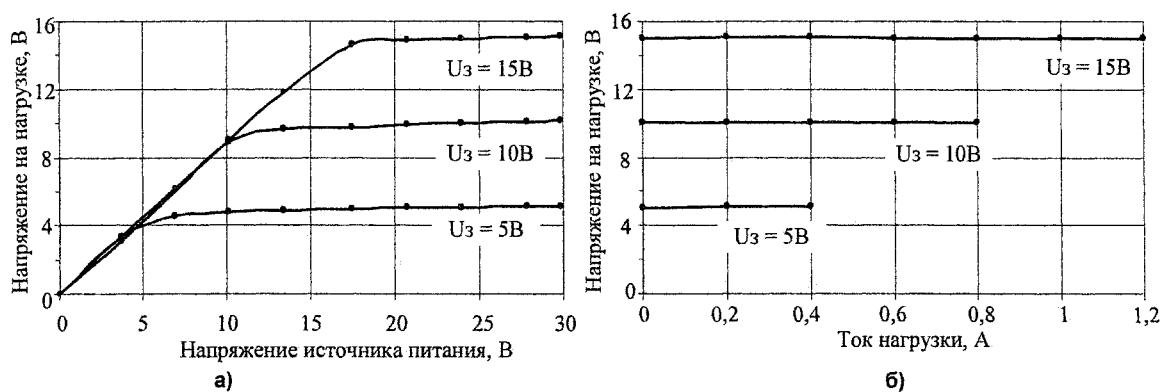


Рис. 7. Экспериментальные характеристики импульсного стабилизатора постоянного напряжения: а) «вход-выход» $U_{ВЫХ} = f(U_{ИП})$; б) внешние ($U_{ИП} = 25 \text{ В}$, $f_{ШИМ} = 10 \text{ кГц}$)

стоянного напряжения, снятые при работе информационно-измерительной системы, но с «ручным» изменением нагрузки.

На рис. 8 приведены временные диаграммы напряжений и токов в двухзвенном преобразователе частоты: напряжение и ток, потребляемый из сети; первая гармоника фазного напряжения нагрузки и ток нагрузки, снятые при помощи программы L-Graph.

На рис. 9 приведены внешние характеристики двухзвенного преобразователя частоты, снятые при работе информационно-измерительной системы, но с «ручным» изменением нагрузки.

Энергетические характеристики двухзвенного преобразователя частоты, снятые в автоматическом режиме, представлены на рис. 10, 11.

При проведении лабораторных работ обеспечивается преимущество с лабораторными работами по физической электронике и согласование с последующими работами по спецкурсам.

Методическое обеспечение позволяет проводить физическое и виртуальное моделирование как совместно, так и раздельно. Такое построение лабораторного практикума будет способствовать более глубокому изучению курса, развитию интереса учащихся, а также облегчит самостоятельную

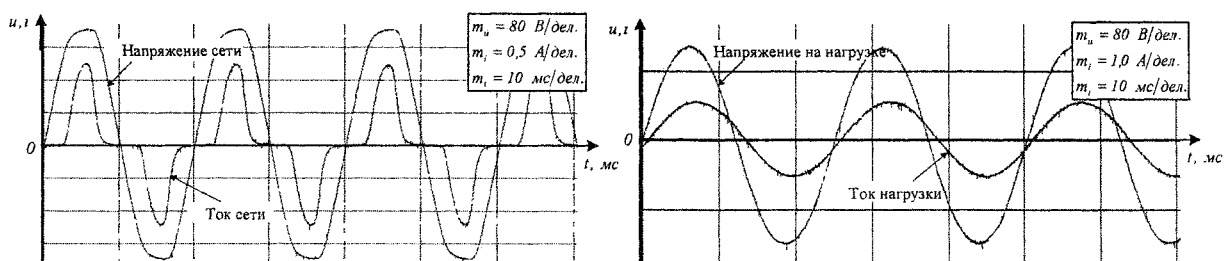


Рис. 8. Временные диаграммы двухзвенного преобразователя частоты: а) напряжение и ток, потребляемый из сети; б) первая гармоника фазного напряжения на нагрузке и ток нагрузки

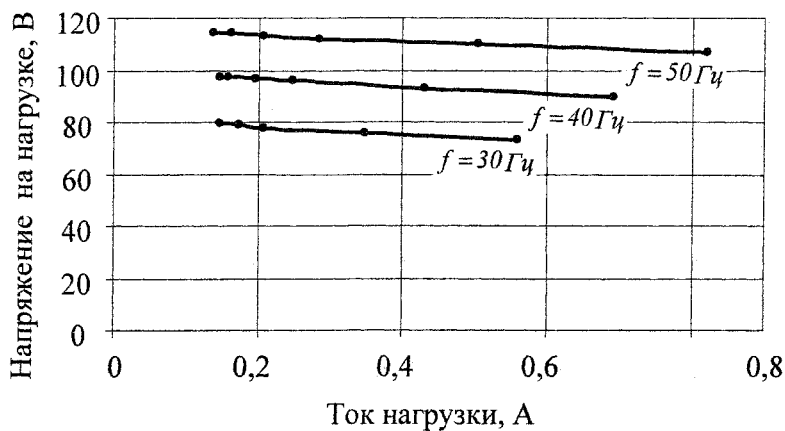


Рис. 9. Экспериментальные внешние характеристики двухзвенного преобразователя частоты

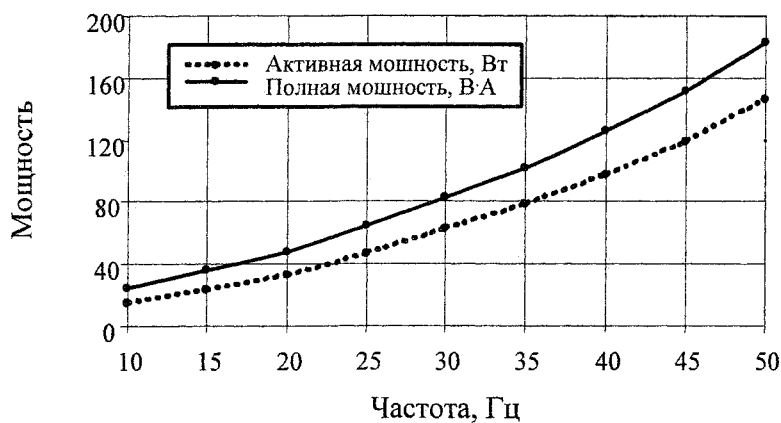


Рис. 10. Активная и полная мощности, потребляемые из сети двухзвенным преобразователем частоты при частотном регулировании $R_n = 600 \text{ Ом}$, $L_n = 80 \text{ мГн}$

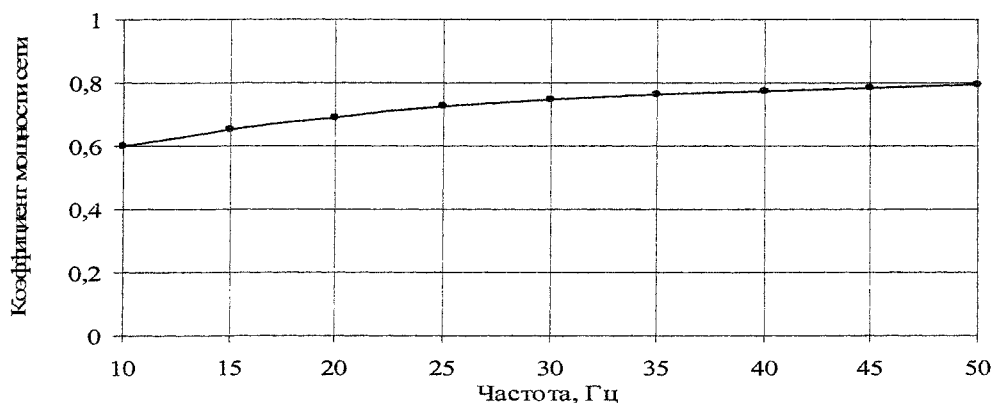


Рис. 11. Коэффициент мощности на входе двухзвенного преобразователя частоты при частотном регулировании

работу студентов, что особенно актуально для студентов-заочников.

Разработка автоматизированного лабораторного комплекса по преобразовательной технике выполняется совместно Южно-Уральским государственным университетом и РНПО «Росучприбор» в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)», а также при

финансовой поддержке Правительства Челябинской области.

Литература

1. Анализ тенденций развития лабораторных стендов по электротехнике и электронике / Р.З. Хусаинов, В.Н. Бородеянко, М.В. Гельман и др. // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: тр. XI междунар. конф. – Крым, Алушта, 2006. – Ч. 2. – С. 303–304.

2. *Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Кн. 2. Электрические машины. Промышленная электроника. Теория автоматического управления / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова.* –

Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 711 с.

3. *Андреев, А.Н. Распределенные модели устройств автоматического управления / А.Н. Андреев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2006. – Вып. 6. – №9. – С. 27–28.*

Гельман Морис Владимирович – профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, кандидат технических наук. Окончил УПИ в 1953 г. Научные интересы – энергетическая электроника и ее приложения.

Хусаинов Рустам Зайнагеддинович – доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, кандидат технических наук. Окончил ЧПИ в 1982 г. Научные интересы – следящие системы электропривода, цифровые системы управления и микроконтроллеры.

Дудкин Максим Михайлович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ. Выпускник кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ 2004 г. Научное направление – элементы систем управления вентильными преобразователями.

Терещина Олеся Геннадьевна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ. Выпускница кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ 2004 г. Научное направление – многозонные интегрирующие разветвляющие преобразователи.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Н.М. Сапрунова
г. Челябинск, ЮУрГУ

Определены условия работы тиристоров для первого периода работы в схеме тиристорного преобразователя постоянного напряжения.

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения, выполненные на тиристорах, применяются для электроэрозионной обработки материалов [1]. Исследование вольт-временных характеристик эрозионного промежутка приведено в работах Лившица А.Л. и др. авторов [2]. В них показано, что в первом приближении эрозионный промежуток можно представить против-ЭДС E_3 , если длительность импульса тока через него больше, чем 3τ , где τ – постоянная времени эрозионного промежутка.

Схема исследуемого генератора импульсов приведена на рис. 1, где VS_1 – рабочий тиристор; VS_2 – коммутирующий тиристор; R_n – токоограничивающее сопротивление; E_3 – против-ЭДС нагрузки; R_m – шунтирующее сопротивление, замыкающее контур тока при отсутствии электрического разряда в промежутке.

В задачу исследования входит определение следующих показателей работы генератора импульсов: 1) времени, предоставляемого на восстановление управляемости тиристоров VS_1 и VS_2 ; 2) максимального напряжения на конденсаторе C , тиристорах и диоде VD .

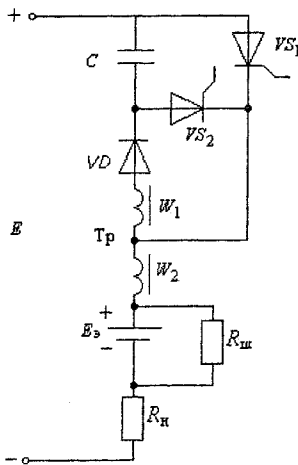


Рис. 1. Схема тиристорного генератора импульсов

При анализе схемы приняты следующие допущения: 1) тиристоры – идеальные ключи; 2) индуктивность намагничивания L_m трансформатора постоянная, а индуктивностью рассеяния можно пренебречь; 3) схема питается от источника ЭДС.

Допустим, что в первый период работы генератора не произошло разряда в эрозионном промежутке и нагрузка носит активный характер. Период работы разбит на несколько участков (рис. 2).

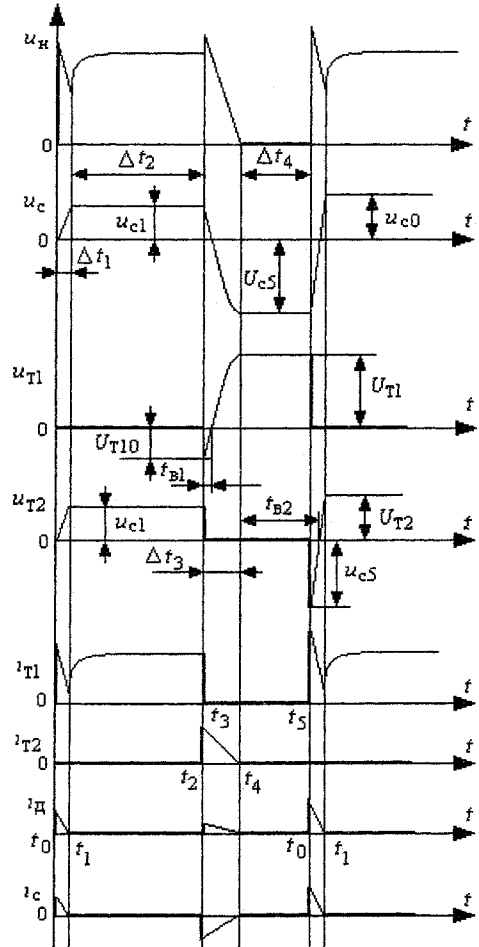


Рис. 2. Временные диаграммы работы

Соответственно принятым допущениям схема замещения для первого участка работы при включении тиристора VS_1 приведена на рис. 3, где R_d – сопротивление диода и соединительных проводов. Контур диода и конденсатора для интервала времени Δt_1 приведен к первичной обмотке трансформатора через коэффициент трансформации

$$k = w_1/w_2 : C' = c/k^2, R'_d = R_d \cdot k^2,$$

$$i'_2 = i_2/k, u'_c = u_c \cdot k. \quad (1)$$

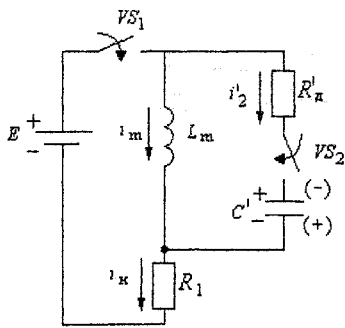


Рис. 3. Схема замещения для первого участка работы

На первом участке работы Δt_1 конденсатор заряжается до некоторого начального напряжения U_{c1} , полярность которого обозначена на рис. 3 без скобок. Наличие в схеме индуктивности и емкости создает условия для протекания либо апериодического, либо колебательного процессов. В дальнейшем индексам «а» обозначаются величины для апериодического процесса, индексом «к» – для колебательного.

На основании решения операторных уравнений для первого участка работы находится ток:

$$I'_2 = \frac{p^2 \cdot E(p)}{R \cdot (p^2 + a' \cdot p + d')}, \quad (2)$$

где $R = R'_d + R_n + R_m$, $R_1 = R_n + R_m$,

$$a' = \frac{c' \cdot R'_d \cdot R_n + L_m}{L_m \cdot c' \cdot R}, \quad d' = \frac{R_n}{L_m \cdot c' \cdot R}. \quad (3)$$

Заряд конденсатора заканчивается в момент прохождения через ноль зарядного тока емкости. Напряжение на обкладках конденсатора $U_c(t)$ нарастает от нуля до значения, определяемого временем заряда, и блокируется диодом VD. Из условия $i'_2(t) = 0$ находятся времена заряда конденсатора Δt_{1a} и Δt_{1k} :

$$\Delta t_{1a} = \frac{1}{b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{4(a')^2 - 4(b')^2}}, \quad (4)$$

$$\Delta t_{1k} = \frac{1}{\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{4(\omega')^2 + 4(a')^2}}, \quad (5)$$

$$\text{где } b' = \sqrt{\frac{(a')^2}{4} - d'}, \quad \omega' = \sqrt{d' - \frac{(a')^2}{4}}. \quad (6)$$

Значения Δt_{1a} и Δt_{1k} позволяют определить напряжение на конденсаторе в конце первого участка:

$$\frac{U_{ca1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \times \exp \left[-\frac{a'}{2b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \right], \quad (7)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(\omega')^2 - 4(a')^2}} \times \exp \left[-\frac{a'}{2\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{(a')^2 + 4(\omega')^2}} \right] \quad (8)$$

Искомые величины времени заряда и напряжения на конденсаторе удобно выразить в относительных единицах, причем, в первом приближении считать $R_n > R'_d$. Постоянные времени и время восстановления рассматриваются относительно периода следования импульсов T:

$$\frac{L_m}{R_n T} = \tau_0, \quad \frac{CR_n}{T} = \tau_3, \quad \frac{L_m}{R'_d T} = \tau_p, \quad \frac{t_g}{T} = \tau_e. \quad (9)$$

Время заряда и начальное напряжение на конденсаторе определяются из выражений:

$$\frac{\Delta t_{1a}}{T\tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}}, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta t_{1k}}{T\tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1}, \quad (11)$$

$$\frac{U_{ca1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}} \right], \quad (12)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1} \right], \quad (13)$$

где $A = \frac{k^2 \tau_0}{\tau_3}$.

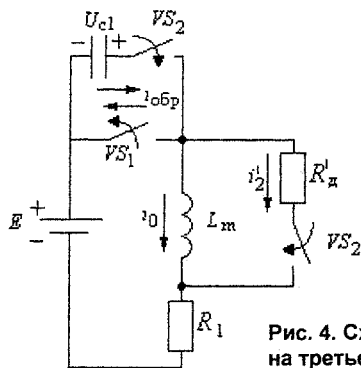
С момента времени t_1 начинается второй участок работы. В схеме рис. 3 остаются два элемента: индуктивность L_m и нагрузка R_n , процессы в которых определяются постоянной времени $\tau_n = L_m/R_n$ и начальным значением тока намагничивания. Значение тока нагрузки находится из выражения:

$$i_n(t) = \frac{E}{R_n} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} \right) \right] + i_m(t_1) \cdot \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} \right). \quad (14)$$

При условии, что длительность импульса тока нагрузки подчиняется неравенству $t_n > \tau_n$, в нагрузке устанавливается значение тока $I_0 = E/R_n$.

В момент времени t_2 происходит включение тиристора VS_2 . Напряжение на конденсаторе не изменилось: $U_{c2} = U_{c1}$. Начинается третий участок работы. Схема замещения для него приведена на рис. 4. Начинается выключение тиристора VS_1 , сопровождаемое протеканием обратного тока в контуре $C-VS_2-VS_1$. Зная уменьшение напряжения U_{c2} на конденсаторе за счет протекания обратного

тока тиристора, можно определить напряжение конденсатора после выключения тиристора VS_1 . Изменение напряжения определяется по изменению заряда на обкладках конденсатора.



При протекании прямого тока в слух р и п тиристора накапливается некоторый заряд Q_{np} . Величина накопленного заряда является функцией прямого тока, и скорости изменения прямого тока в момент времени перед коммутацией. Заряд восстановления тиристора Q_a определяется по методике, приведенной в [3].

Вычисляется ампер-секундный интеграл за последние 6 мкс проводимости прямого тока: $Q_{np} = I_a \cdot 6 \cdot 10^{-6}$ Ас. По зависимости

$$\left| \frac{Q_a}{Q_{np}} \right| \% = f \left(\frac{di}{dt} \right) \text{ определяется } \left| \frac{Q_a}{Q_{np}} \right| \%. \text{ При-}$$

чем, при $\frac{di}{dt} > 100$ А/мкс кривая относительного значения обратного заряда стремится к двукратному насыщению. Изменение напряжения на конденсаторе равно $\Delta U_c = Q_a / C$. Расчеты, проведенные для значений $I_a = (10 \dots 200)$ А и соответствующих им значений коммутирующих емкостей, показали, что изменение напряжения на конденсаторе невелико по сравнению с начальным значением: $8\% U_{c0} > \Delta U_c > 0,5\% U_{c0}$. Это позволяет принять значение напряжения на конденсаторе в момент времени t_3 таким же, как для момента времени t_2 .

С момента t_3 начинается четвертый участок работы – процесс перезаряда конденсатора. Схема замещения приведена на рис. 5.

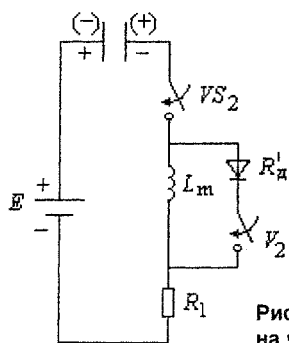


Рис. 5. Схема замещения на четвертом участке работы

Для нее найдены значения напряжений на конденсаторе $U_{ca}(t)$ и $U_{ck}(t)$.

Промежуток времени, в течение которого напряжение на конденсаторе уменьшается от начального начального значения до нуля, определяет время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристора VS_1 :

$$\frac{t_{ca}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{4}{B}}} \arcsin \left[\sqrt{1-\frac{4}{B}} \times \sqrt{1 + \frac{U_{c1}}{E} \left(2 + \frac{U_{c1}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B} - 1} \right] \times \frac{4}{B \left(1 + \frac{U_{c1}}{E} \right)}, \quad (15)$$

$$\frac{t_{ck}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{\frac{4}{B}-1}} \arcsin \left[\sqrt{\frac{4}{B}-1} \times \sqrt{1 + \frac{U_{c1}}{E} \left(2 + \frac{U_{c1}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B} - 1} \right] \times \frac{4}{B \left(1 + \frac{U_{c1}}{E} \right)}, \quad (16)$$

В случае колебательного процесса перезаряда конденсатора на интервале времени Δt_3 величина напряжения на нем превышает E . Тогда после прекращения тока через тиристор VS_2 конденсатор разряжается по цепи $E-R_n-Tr-VS_3$, пока напряжение на нем не достигнет значения E . Начальное напряжение конденсатора U_{c0} для следующего периода работы равно E , так как в токе нагрузки должна быть пауза. Для работы на эрозийный промежуток желательно иметь аperiodический процесс при работе VS_2 , чтобы отсутствовало обратное напряжение на эрозийном промежутке.

Наибольшее обратное напряжение $U_{т10}$ к тиристору VS_1 прикладывается в момент t_2 , следовательно, оно равно U_{c1} . Наибольшее прямое напряжение $U_{т1}$, равное E , прикладывается при аperiodическом процессе с момента t_4 до начала второго периода работы, в колебательном процессе напряжение $U_{т1к}$ – в момент времени t_{m3} :

$$\frac{U_{т1к}}{E} = \left(1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \right] \left(\cos \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} + \frac{1}{\sqrt{4B-1}} \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} \right) - \frac{U_{c0}}{E} + \frac{2}{\sqrt{4B-1}} \cdot \left(1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \times \exp \left(-\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T}, \quad (17)$$

$$\omega t_{m3} = \arcsin \left[1 + \frac{\frac{a(E+U_{c0}+i_{m3}R\delta) - a^2(E+U_{c0}) - (E+U_{c0})}{2\omega cR} - \frac{a^2(E+U_{c0}) - (E+U_{c0})}{4\omega^2}}{\frac{a}{2}(E+U_{c0}) - \frac{a}{2\omega}(E+U_{c0}) + \frac{E+U_{c0}-i_{m3}R\delta}{\omega cR}} \right], \quad (18)$$

где $a = \frac{L_m + RR'C}{CL_m R}$, $d = \frac{R'_0}{CL_m R}$, $\omega = \sqrt{d - \frac{a^2}{4}}$,

$$B = \frac{k^2 \tau_3}{\tau_p}, \quad (19)$$

$$i_{m3} = \left(\frac{E+U_{c0}}{R} \cdot \frac{R'_0}{L_m} + \frac{2I_0 L_m d}{R} \right) \cdot \frac{\sin \omega t}{\omega} \cdot \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) + \frac{2(E+U_{c0}+I_0 L_m a) - I_0 R'_0}{R} \left(\cos \omega t - \frac{a}{2\omega} \sin \omega t \right) \times \exp\left(-\frac{a}{2}t\right). \quad (20)$$

Наименьшее прямое напряжение, равное U_{c1} , прикладывается к тиристор VS_2 после заряда конденсатора. С точки зрения времени, представляемого на восстановление управляемости, тиристор VS_2 находится в лучших условиях, чем тиристор VS_1 . В течение интервала времени Δt_4 напряжение анод-катод тиристора VS_2 равно нулю, а после начала второго периода становится отрицательным. Наибольшее значение обратного напряжения оп-

ределено в конце интервала Δt_3 : $U_{T2D} = U_{C5}$.

Зажигание дугового разряда на эрозионном промежутке происходит в начале одного из периодов работы, в том числе, может произойти в первом периоде. Тогда в схемах рис. 1, 3, 4, 5 действует разность ЭДС ($E-E_3$) и выражения, полученные для активной нагрузки, справедливы для нагрузки в виде противо-ЭДС.

Выводы

1. Условия работы тиристора VS_1 тяжелее, чем тиристора VS_2 .

2. Время, предоставляемое на восстановление запирающих свойств тиристора VS_1 , необходимо определять для первого периода работы, связанного с первоначальным включением VS_1 .

Литература

1. Бронштейн, Л.И. Исследование и разработка источников питания для электроэрозионных станков на базе тиристорных прерывателей постоянного тока: дис. ... к.т.н. / Л.И. Бронштейн. – Львов, 1974. – 35 с.
2. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Соценко. – М.: Машиностроение, 1967. – 295 с.
3. Кремниевые управляемые вентили-тиристоры. Технический справочник / под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергия, 1964. – 360 с.

Сапрунова Надежда Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, окончила ЧПИ в 1962 г. по специальности «Автоматика и телемеханика».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ ДИОДА

С.П. Лохов, А.Е. Тураев
г. Челябинск, ЮУрГУ

Сравниваются переходные характеристики реального полупроводникового диода и результаты моделирования на ЭВМ р-п-перехода как управляемого сопротивления со смещениями, что приближает исследуемые процессы к полевому триоду.

В рамках предложенной в работе [1] математической модели инерция накоплений силовых объемных зарядов заменена на инерцию процессов управления параметрами канала. Отсюда и термин: полевая модель, хотя с общих позиций модели без учета физики процессов называют «моделями черного ящика». Дополнительно учтены пока постоянная емкость C_d перехода, а также – инерции входов вертикальной $W_y(p)$ и горизонтальной $W_x(p)$ разверток осциллографа. Получено хорошее совпадение результатов моделирования не с недоступными для наблюдения процессами в диоде, а с процессами в лабораторной установке для исследования этих процессов.

Согласно предложениям в [1] полевая модель на рис. 1 включает в себя три безынерционных по силовым сигналам (напряжение на них и ток через них) элемента: r_{pn} – дифференциальное сопротивление p - n -перехода, генераторы напряжения (E_{pn}) и тока (I_{pn}). Объемное сопротивление базы r_d и емкость C_d следует отнести к неидеальностям p - n -перехода и считать элементами модели уже диода, а не p - n -перехода. В статическом состоянии генераторы работают в режиме полной компенсации напряжения u_d и тока i_d рабочей точки p - n -перехода, поэтому $E_{pn} = u_d$, $I_{pn} = i_d$ и ток $i_{pn} = 0$. Можно переключить генератор тока строго параллельно сопротивлению r_{pn} , а генератор напряжения – последовательно с ними. Это несколько изменит характер процессов, но как лучше – пока не ясно. Каждая рабочая точка принадлежит вольт-амперной характеристике (ВАХ) p - n -перехода при любом ее математическом описании

с учетом всех пока неучтенных тонкостей влияний температуры, радиации, явлений пробоя. В исследованиях принят упрощенный вариант «распрямленной экспоненты» с экспонентой в центральной части и прямыми по краям

$$I_{pn} = I_o \cdot \left(e^{\left(\frac{E_{pn}}{f_i} \right)} - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь $f_i = 0,026 \cdot M$ В (при температуре 300 К для кремния) – температурный потенциал [2], $M = 1-2,5$ – эмпирический поправочный коэффициент, I_o – обратный тепловой ток. Если взять из справочника номинальные значения напряжения U_{dn} и тока I_{dn} диода и его эквивалентное напряжение отсечки U_{do} (точка пересечения касательной к номинальной точке ВАХ с осью абсцисс), то объемное сопротивление базы и уравнение прямой (первая ключевая идея [1]) для протекания быстрых процессов $u_d(t)$, $i_d(t)$ (без тока емкости C_d)

$$r_d = \frac{(U_{dn} - U_{do} - f_i)}{I_{dn}},$$

$$(u_d - E_{pn}) = (i_d - I_{pn}) \cdot r_{pn}. \quad (2)$$

Пять параметров U_{dn} , I_{dn} , U_{do} , I_o , M определили статическую ВАХ диода. Формулы зависимости I_o , f_i от температуры имеются в справочниках.

В динамике взаимосвязанные формулой (1) E_{pn} и I_{pn} работают как медленные регуляторы поддержания нулевого значения тока i_{pn} – вторая ключевая идея [1]. Также влияет на динамику емкость C_d . При всей простоте идеи трудно дать точные ре-

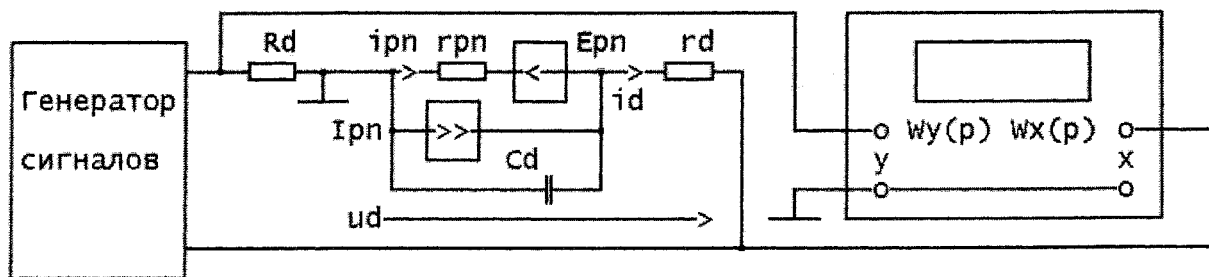


Рис. 1. Схема модели р-п-перехода и лабораторной установки

комендации по реализации регуляторов. При эксперименте использованы следующие интегральные регуляторы с логическими переключениями:

$$\text{Если } u_d > 0, \text{ то } dI_{pn}/dt = i_{pn}/T_i; \quad (3a)$$

$$\text{если } u_d < 0, \text{ то } dE_{pn}/dt = r_{pn} * i_{pn}/T_e; \quad (3б)$$

$$\text{если } dE_{pn}/dt > 0, \text{ то } dE_{pn}/dt \leq K_{ve} * dE_{pn}/d; \quad (3в)$$

$$\text{если } dI_{pn}/dt > 0, \text{ то } dI_{pn}/dt \leq K_{vi} * dI_{pn}/d. \quad (3г)$$

Для упрощения приняты равные постоянные интегрирования $T_e = T_i$ и коэффициенты выключения $K_{ve} = K_{vi}$. Таким образом, динамика добавила нам три параметра T_e, K_{ve}, C_d и некоторое разнообразие логических условий. Далее подбором всех параметров удалось получить приемлемое совпадение экспериментальных осциллограмм с рассчитанными на ЭВМ переходными процессами, но... Не получилось даже качественное совпадение процессов на фазовой плоскости в осях тока и напряжения.

Главным виновником оказалось несовпадение динамических характеристик осциллографа по

входам x и $y, W_x(p)$ и $W_y(p)$. Почти полное качественное совпадение процессов на фазовых плоскостях удалось получить при аппроксимации передаточных функций входов уравнениями

$$T_x^2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \cdot a \cdot T_x \cdot \frac{dx}{dt} + x = u_d; \quad (4a)$$

$$T_y^2 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + 2 \cdot a \cdot T_y \cdot \frac{dy}{dt} + y = i_d. \quad (4б)$$

При этом постоянные времени отличались в два раза при равенстве коэффициентов колебательности $a = 0,4$.

На следующем рисунке приведены результаты моделирования диода на ЭВМ. Экспериментальная осциллограмма приведена на рис. 3, она качественно совпала с результатами моделирования на рис. 2 а, б даже в мелкой «бородe» после фронтов. Интересно сравнить диаграммы u_d и x, i_d и y – без и с учетом паразитных фильтров (4) на входах осциллографов. Мы видим либо полное

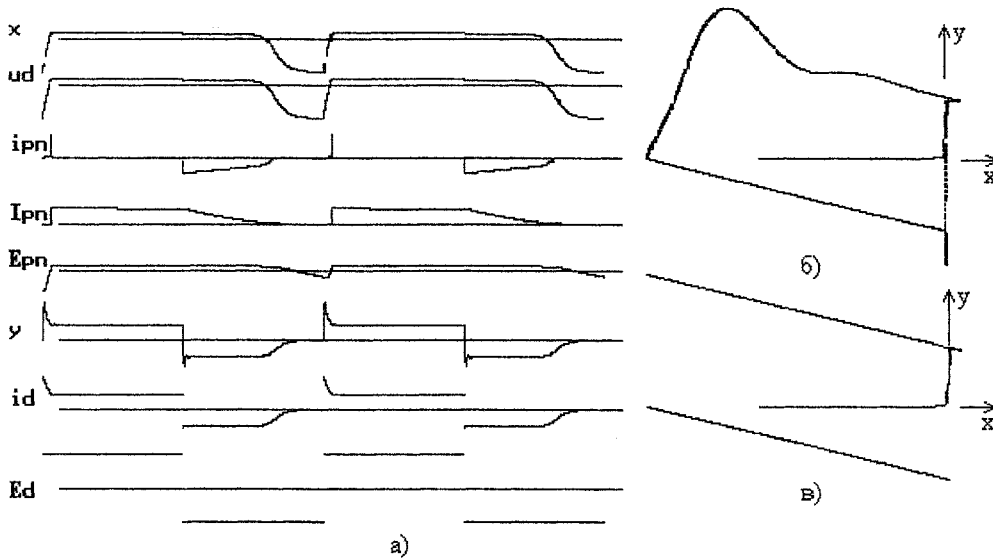


Рис. 2. Результаты моделирования в функции времени (а), фазовая траектория с фильтрами осциллографа (б), фазовая траектория без фильтров (в)

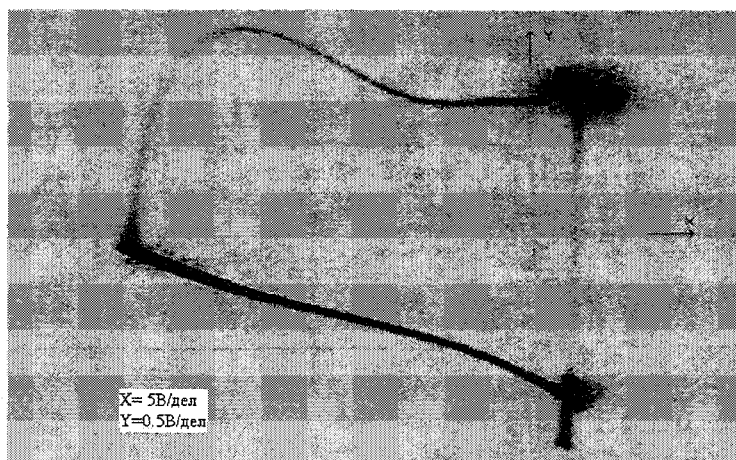


Рис. 3. Экспериментальная осциллограмма

совпадение, либо незначительное отличие диаграмм. Тем разительнее качественное несовпадение фазовых диаграмм этих же сигналов на рис. 2 б и 2 в. Надо напомнить, что постоянные времени T_x , T_y малы, и мы почти не видим влияния фильтров (4) на временных диаграммах, тем разительнее их влияние на фазовые диаграммы. Когда на мониторе была получена диаграмма рис. 2 в, а эксперимент показал на экране осциллографа почти рис. 2 б, то энтузиазм автора двух ключевых идей [1] заметно поубавился. Учет моделей фильтров (4) приподнял настроение.

Данные лабораторной установки: генератор сигналов специальной формы Гб-31, осциллограф

С1-83, диод кремниевый КД203А, резистор 100 Ом МЛТ-0.5.

Литература

1 Лохов, С.П. Компьютерная модель р-п-перехода и методы расчета / С.П. Лохов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – №11(27). – С. 50–52.

2. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1967. – 616 с.

3. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. – М.: Высшая школа, 1973. – 398 с.

Лохов Сергей Прокопьевич, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ, доктор технических наук, профессор. Выпускник кафедры электропривода ЧПИ 1968 г. Научные интересы связаны с теоретическими основами электротехники и моделированием электромеханических систем.

Тураев Андрей Евгеньевич, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ. Выпускник кафедры электропривода ЧПИ 1988 г. Научные интересы связаны с компьютерными системами.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С РАЗЛИЧНЫМ ПРИНЦИПОМ ПОСТРОЕНИЯ*

М.М. Дудкин

г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматриваются принципы построения фазосдвигающих устройств (ФСУ) различных классов, применяемых в системах импульсно-фазового управления вентильными преобразователями. Приведены структурные схемы ФСУ, временные диаграммы их работы, а также сравнительный анализ их помехоустойчивости при воздействии гармонической помехи в широком частотном диапазоне на информационный вход устройства. Результаты получены на основе математического моделирования в среде MatLab v6.5 + Simulink v5.0.

На промышленных предприятиях по причине взаимного влияния вентильных преобразователей (ВП) через сеть и высокого уровня помех в каналах передачи информации наблюдается достаточно высокий поток аварийных отключений электроприводов из-за низкой помехоустойчивости элементов ВП, в частности, фазосдвигающих устройств (ФСУ). Поэтому в области автоматизированного электропривода одно из ведущих мест занимает проблема помехоустойчивости элементов системы управления [1], т.е. способность элементов системы регулирования ВП правильно передавать информацию, несмотря на наличие помех на их входах.

Анализ уровня помех на различных промышленных объектах показал [2-3], что для обеспечения качественного функционирования систем электропривода система импульсно-фазового управления (СИФУ) вентильными преобразователями должны сохранять свои номинальные характеристики в диапазоне частот сигналов помех $f = 50 \dots 1200$ Гц при $\bar{A}_D = A_D / X_{\max} \leq 0,1$, где A_D – амплитуда сигнала помехи, а X_{\max} – максимальный уровень входного информативного сиг-

нала ФСУ. Наиболее опасными помехами в системах промышленной автоматики являются гармонические [1–4], которые могут привести:

- к паразитной низкочастотной амплитудной модуляции выходного сигнала схем управления;
- постоянно действующей перегрузке по току ряда элементов схемы, борьба с которыми весьма затруднительна [4];
- изменению статических и динамических характеристик отдельных элементов и замкнутой системы электропривода в целом [1];
- и, в некоторых случаях, к полной неработоспособности схемы управления.

В связи с этим актуальна задача сравнительного анализа помехоустойчивости различных классов ФСУ с целью выбора оптимального варианта, обеспечивающего при простоте технической реализации высокие метрологические характеристики системы управления ВП.

Для решения поставленной задачи в качестве примера в среде MatLab v6.5 + Simulink v5.0 была составлена математическая модель тиристорного регулятора переменного напряжения (рис. 1).

В ее состав входят: источник трехфазного напряжения (1), система импульсно-фазового

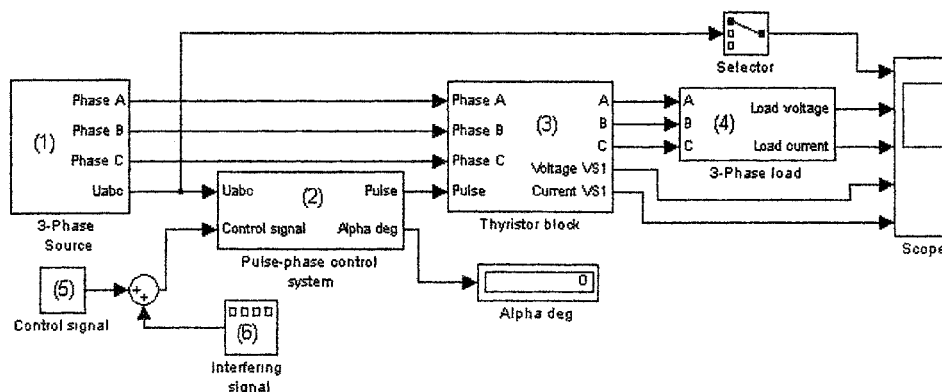


Рис. 1. Математическая модель системы тиристорного регулятора переменного напряжения

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Челябинской области.

управления (2), блок тиристоров (3), трехфазная активно-индуктивная нагрузка (4), источник сигнала задания (5), блок (6), имитирующий сигнал помехи синусоидальной формы, а также регистрирующие приборы.

Блок тиристоров (3) представляет собой шесть встречно-параллельно включенных тиристоров, управляемых СИФУ (2), выполненной по многоканальному синхронному принципу [5], где каждый из ее каналов синхронизирован с соответствующей фазой напряжения сети. В свою очередь СИФУ (2) состоит из устройства синхронизации, предназначенного для синхронизации системы управления с напряжением сети; ФСУ, обеспечивающего изменение фазы (угла) управляющего импульса в функции сигнала задания (5) и распределителя импульсов управления.

В математической модели (рис. 1) преду-

смотрена возможность в блоке СИФУ (2) выбирать фазосдвигающие устройства трех классов: разомкнутого с выборкой мгновенных значений сигнала управления, получившего в литературных источниках название ФСУ с «вертикальным» управлением, интегрирующего число-импульсного с «горизонтальным» управлением и замкнутого интегрирующего с синхронизацией со стороны релейного элемента РЭ [6–7]. Структурные схемы и временные диаграммы сигналов исследуемых устройств приведены в табл. 1

ФСУ с «вертикальным» управлением (табл. 1, рис. 1) с параметрической (независящей от входного сигнала) разверткой $Y_{И}(t) = X_0 \cdot t / T_{И}$, где X_0 – опорный сигнал, включает в себя интегратор И с постоянной времени $T_{И}$ и релейный элемент РЭ. Принцип действия ФСУ основан на непо-

Таблица 1

Структурные схемы и временные диаграммы сигналов ФСУ различных классов

Название	Структурная схема	Временные диаграммы сигналов
ФСУ с «вертикальным» управлением	<p style="text-align: center;">Рис. 1</p>	<p style="text-align: center;">Рис. 2</p>
Интегрирующее число-импульсное ФСУ с «горизонтальным» управлением	<p style="text-align: center;">Рис. 3</p>	<p style="text-align: center;">Рис. 4</p>
Замкнутое интегрирующее ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ	<p style="text-align: center;">Рис. 5</p>	<p style="text-align: center;">Рис. 6</p>

Преобразовательная техника

средственном сравнении параметрической развертки $Y_H(t)$ с сигналом управления X_{BX} (табл. 1, рис. 2). В момент времени t_n , соответствующему равенству $Y_H(t) = X_{BX}$, формируется импульс управления тиристором. Синхронизация сигнала развертки $Y_H(t)$ с напряжением сети происходит в моменты времени $t = n \cdot T_0$ импульсом с выхода устройства синхронизации (УС) (табл. 1, рис. 2 а), когда в интеграторе И происходит установка нулевых начальных условий (табл. 1, рис. 1). Здесь: T_0 – период сигнала $Y_H(t)$, равный половине периода питающей сети; $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число, соответствующее номеру интервала дискретизации.

Интегрирующее число-импульсное ФСУ с «горизонтальным» управлением (табл. 2, рис. 3 а) включает в себя преобразователь напряжения в частоту импульсов ПНЧ, суммирующий счетчик СТ и логические элементы Л1, Л2 типа «2И».

ПНЧ (табл. 1, рис. 3 б) выполнен по схеме интегрирующего преобразователя с установкой

нулевых начальных условий в канале интегрирования и обладает повышенной помехоустойчивостью к сигналам внешних помех со стороны информационного входа по сравнению с другими ПНЧ [8].

В момент времени перехода напряжением сети через нулевой уровень СТ «обнуляется» импульсом малой длительности с выхода устройства синхронизации СИФУ (табл. 1, рис. 4 а), а элемент Л1 открывается сигналом «1» с инверсного выхода \bar{Q}_{n-1} старшего разряда СТ. С помощью ПНЧ сигнал управления X_{BX} преобразуется в импульсы с частотой f_1, f_2, \dots, f_n (табл. 1, рис. 4 в), пропорциональной X_{BX} (табл. 1, рис. 4 б). В счетчике СТ накапливается число $N(t)$ (табл. 1, рис. 4 г). При переходе старшего разряда СТ в состояние $\bar{Q}_{n-1} = 0$ логический элемент Л1 закрывается, и счет прекращается. Одновременно сигналом $Q_{n-1} = 1$ с прямого выхода старшего разряда СТ (табл. 1, рис. 3) открывается элемент Л2, и импульсы с выхода генератора (табл. 1, рис. 4 д) по-

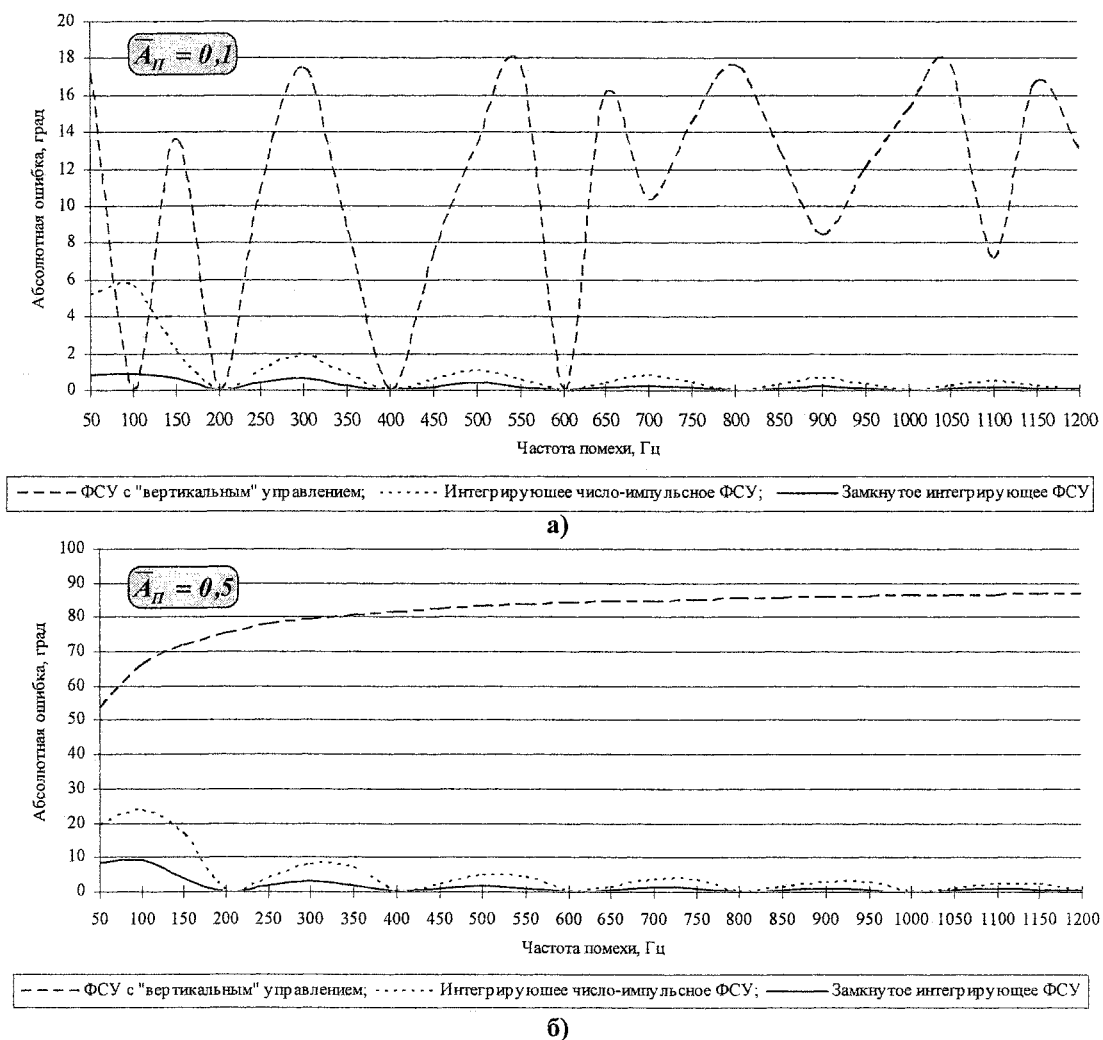


Рис. 2. Абсолютная ошибка угла управления $\Delta\alpha$ под действием сигнала помехи для различных классов фазосдвигающих устройств: а) $\bar{A}_H = 0,1$; б) $\bar{A}_H = 0,5$

даются на управляющий переход соответствующего из силовых тиристоров ВП (табл. 1, рис. 4 е).

Длительность открытого состояния тиристоров зависит от амплитуды сигнала X_{BX} (табл. 1, рис. 4 б), определяющего угол управления $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ (табл. 1, рис. 4 в).

Замкнутое интегрирующее ФСУ с синхронизацией со стороны релейного элемента РЭ выполнено на основе автоколебательного разветвляющего преобразователя, включающего сумматор Σ , интегратор И с постоянной времени $T_{И2}$, релейный элемент РЭ с безгистерезисной и симметричной относительно нуля характеристикой (табл. 1, рис. 5). Перевод ФСУ в режим вынужденных переключений производится от генератора пилообразного напряжения ГПН, формирующего сигнал ведущей разветвляющей функции $Y_{И1}(t) = X_0 \cdot t / T_{И1}$, синхронизированного с напряжением сети (табл. 1, рис. 6 а-б), где: X_0 – опорный сигнал ГПН; $T_{И1}$ – постоянная времени ГПН, причем $T_{И1} < T_{И2}$.

Ведущая развертка $Y_{И2}(t)$ представляет собой результат интегрирования суммы или разности выходного сигнала $Y(t)$ и входного воздействия X_{BX} (табл. 1, рис. 6). Импульс управления тиристором на выходе СИФУ формируется в момент равенства нарастающего фронта ведущей $Y_{И1}(t)$ и спадающего фронта ведомой $Y_{И2}(t)$ разверток. Скважность $\gamma = \alpha_n / 180$ эл. град выходных импульсов $Y(t)$ (табл. 1, рис. 6 в) (угол управления тиристором $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$) определяется величиной сигнала управления X_{BX} .

Последовательность эксперимента в среде MatLab v6.5 + Simulink v5.0 заключалась в следующем:

1. Для всех трех классов ФСУ измерялся угол управления α_0 при отсутствии сигнала помехи на их информационных входах. При этом сигнал управления \bar{X}_{BX} выбирался таким образом, чтобы угол α_0 для исследуемых устройств составил 90 эл. град.

2. Измерялся угол управления $\alpha_{П}$, соответствующий максимальному отклонению угла от заданного значения α_0 , при воздействии на информационный вход ФСУ вместе с полезной составляющей X_{BX} гармонического сигнала помехи $X_{П}(t)$ в частотном диапазоне 50–1200 Гц.

3. Пункт 2 эксперимента проводился для двух нормированных значений амплитуды помехи $\bar{A}_{П} = 0,1$ и $\bar{A}_{П} = 0,5$.

Результаты эксперимента представлены в виде графиков $\Delta\alpha = F(f_{П}, \bar{A}_{П} = 0,1)$ и

$\Delta\alpha = F(f_{П}, \bar{A}_{П} = 0,5)$ (см. рис. 2), где $\Delta\alpha = |\alpha_0 - \alpha_{П}|$ – абсолютная ошибка угла управления в результате воздействия сигнала помехи $X_{П}(t)$ с частотой $f_{П}$.

При моделировании начальная частота ПНЧ $f_0 = X_0 / 2 \cdot b \cdot T_B$ (табл. 1, рис. 3 б) (при нулевом входном сигнале) составила 25,6 кГц, где X_0 – опорное напряжение; b – порог переключения РЭ; $T_{И}$ – постоянная времени интегрирования ПНЧ. Для замкнутого интегрирующего ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ (табл. 1, рис. 5) соотношение между постоянными времени интегрирования $T_{И2}$ и $T_{И1}$ равнялось двум ($T_{И2} / T_{И1} = 2$), что обеспечивает достаточно высокое быстродействие (малую инерционность) устройству.

Характеристики, показанные на рис. 2, позволяют сделать следующие выводы:

1. Интегрирующие фазосдвигающие устройства, по сравнению с ФСУ «вертикального» типа, обладают повышенной помехоустойчивостью. Так при $\bar{A}_{П} = 0,1$ максимальная абсолютная ошибка угла управления для ФСУ с «вертикальным» управлением составляет 18 эл. град., а для интегрирующих – 6 эл. град. для число-импульсного ФСУ и 1 эл. град. для замкнутого ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ. Это вызвано следующими факторами. В разомкнутом интегрирующих ФСУ сигнал помехи, воздействующий на вход системы, подвергается операции двойного интегрирования. Первым каналом интегрирования является ПНЧ, вторым – СТ. В замкнутых интегрирующих ФСУ снижение ошибки угла управления $\Delta\alpha$ достигается за счет обратной связи ФСУ и наличия интегратора в прямом канале регулирования. В ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления сигнал помехи поступает непосредственно на вход РЭ, сравниваясь с сигналом развертки $Y_{И}(t)$.

2. Низкая помехоустойчивость ФСУ с «вертикальным» управлением объясняется также тем обстоятельством, что при высокой амплитуде и производной сигнала помехи $X_{П}(t)$, превышающей скорость нарастания развертки $Y_{И}(t)$, на выходе устройства возникают ложные срабатывания РЭ, приводящие к дополнительным срабатываниям формирователей импульсов. Это не только вызывает существенный рост $\Delta\alpha$ (см. рис. 2 б), но может послужить и причиной аварийного срабатывания защит ВП.

3. Для интегрирующих ФСУ абсолютная ошибка $\Delta\alpha$ уменьшается с ростом частоты помехи. Этот фактор зачастую позволяет исключить на информационном входе СИФУ дополнительных фильтров для подавления высокочастотных помех, что характерно для ВП с ФСУ «вертикального» типа.

4. Замкнутое ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ (табл. 1, рис. 5) обладает наиболее повышенной помехоустойчивостью, что говорит о целесообразности использования данного устройства на промышленных объектах с высоким уровнем помех в канале передачи информации. Кроме того, замкнутое ФСУ обеспечивает адаптацию угла управления по отношению к частоте сети, что необходимо в системах управления с источниками питания ограниченной мощности, характеризующихся нестационарностью параметров сети.

Литература

1. Осипов, О.И. Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин. – М.: Энергия, 1979. – 80 с.
2. Осипов, О.И. Техническое диагностирование промышленных помех и разработка способов их подавления в вентильных электроприводах прокатных станов с элементами УБСР. Дис. ...канд. техн. наук / О.И. Осипов. – Челябинск: ЧПИ, 1974. – 218 с.
3. Пасковатый, О.И. Электрические помехи в системах промышленной автоматики / О.И. Пасковатый. – М.: Энергия, 1973. – 104 с.
4. Осипов, О.И. Уровни промышленных помех в вентильных электроприводах прокатных станов на элементах УБСР / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин // *Электротехн. пром-сть. Сер. «Электропривод»*. – 1974. – Вып. 4. – С. 25–28.
5. Козин, В.М. Управляющие устройства тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока / В.М. Козин, Я.Е. Марченко. – М.: Энергия, 1971. – 324 с.
6. Дудкин, М.М. Сравнительный анализ динамических характеристик фазосдвигающих устройств / М.М. Дудкин; под ред. С.И. Лукьянова // *Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. науч. тр.* – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 11. – С. 87–96.
7. А.с. 1288864, Н02М7/00. Устройство для управления вентильным преобразователем / Цытович Л.И. (СССР) – №3919220/24-07; заявлено 01.07.85, опубл. 07.02.87, Бюл. №5.
8. Дудкин, М.М. Сравнительный анализ динамических характеристик преобразователей напряжения в частоту импульсов / М.М. Дудкин // *Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро-технологии»: тез. докл. в 2-х т.* – Иваново, 2005. – Т.1. – С. 189.

Дудкин Максим Михайлович, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ. Научное направление – элементы и устройства систем управления силовыми вентильными преобразователями.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 62-83.01

ГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ю.С. Усынин, К.М. Виноградов
г. Челябинск, ЮУрГУ

Приводятся принцип работы, сравнение с другими типами генераторов, экспериментальные характеристики, функциональные схемы электрогенераторной установки на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения. Обращается внимание на высокие удельные показатели и благоприятные эксплуатационные характеристики этих электрогенераторных установок.

Введение. Автономные установки для производства электроэнергии, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях, поэтому бесконтактное исполнение генератора является часто не только желательным, но обязательным условием конструирования. Высокие удельные энергосиловые показатели имеют бесконтактные двигатели, выполненные на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) [6, 7, 8]. Между тем работа этой машины в генераторном режиме имеет свои особенности и достоинства, которые ниже и рассмотрены.

Обзор литературы. Известны разные варианты конструкции электрических генераторов для автономной сети. Обычно питание бортовой сети транспортных средств осуществляется от параллельно включенных аккумуляторной батареи и генератора постоянного тока, который приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. В качестве основного источника электроэнергии применяются коллекторные генераторы постоянного тока, а также вентильные генераторы, имеющие ротор с постоянными магнитами [4]. Наличие щеточно-коллекторного узла является главным недостатком коллекторных генераторов и приводит к снижению срока службы генератора, меньшей надежности, неблагоприятным массогабаритным характеристикам. Генераторы с постоянными магнитами характеризуются сложной технологией изготовления, нестабильностью параметров, повышенной мощностью устройств стабилизации выходного напряжения, большой стоимостью.

Надежный ротор имеют индукторные генераторы [1]. Однако для них характерно неудовлетворительное использование электрической машины по стали из-за однонаправленного (пульсирующего) магнитного потока и плохих массогабаритных показателей.

Асинхронные характеризуются простотой [2], однако практически не поддаются регулированию.

Находят также применение бесконтактные синхронные генераторы с возбудителем и вращающимся выпрямителем, с многофазной обмоткой якоря (статора) и силовым многофазным выпрямителем на выходе генератора [3]. Однако размещение на роторе вращающейся обмотки возбуждения и диодов выпрямителя снижает механическую надежность генератора и не позволяет получить высокие угловые скорости вращения ротора.

Принцип работы и особенности конструкции. Как известно [6, 7, 8], в СРМНВ роль обмотки возбуждения выполняют витки тех обмоток, которые располагаются напротив межполюсных промежутков и имеют полный шаг. В электродвигателе одни и те же обмотки поочередно выполняют роль то рабочих обмоток, то обмоток возбуждения в зависимости от того, где в данный момент времени они располагаются: напротив полюса или межполюсного промежутка. Между тем, когда электрическая машина работает в генераторном режиме, то вентили коммутатора, подключенного к рабочим обмоткам, работают в режиме естественной коммутации. Поэтому целесообразно конструктивно разделить цепи обмоток рабочих, которые не требуют искусственной коммутации вентилей и, следовательно, могут быть подключены к неуправляемому выпрямителю, и обмоток возбуждения, которые подключаются на выход управляемого преобразователя. Выбирая длину полюсной дуги соответствующей времени проводимости вентилей (обычно 120 градусов), удается рационально согласовать параметры генератора и преобразователя.

На рис. 1 представлен в разрезе пример трехфазного генератора, когда в пазах статора, расположенных в плоскостях А-а, В-в, С-с, сдвинутых пространственно на 120 градусов, размещены основные (силовые) обмотки, соединенные в звезду.

Кроме силовых обмоток, на статоре аналогичным образом в плоскостях X-x, Y-y, Z-z размещены дополнительные обмотки возбуждения, выполненные с полным шагом.

На рис. 1 они выполнены по однополупериодной схеме, поэтому в каждом из пазов уложено по две встречно включенных полуобмотки.

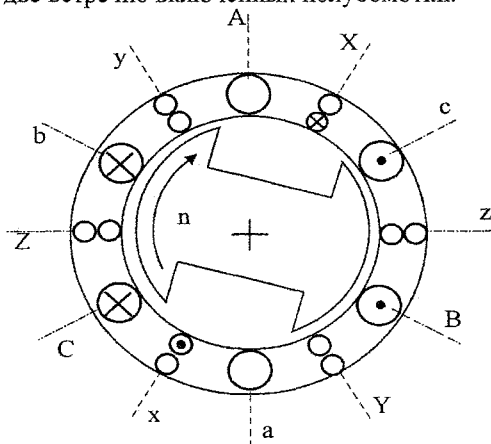


Рис. 1. Схематичный поперечный разрез синхронного генератора

Возможны и другие версии обмоток в генераторе, например, с другим числом фаз, с различным числом фаз обмоток силовых и возбуждения, размещаться не в разных, а в одних и тех же пазах статора.

Ротор имеет явнополюсную конструкцию и не несет на себе обмоток.

Силовые обмотки, соединенные в звезду, через неуправляемый выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме, подключены параллельно с аккумуляторной батареей к бортовой сети постоянного тока. Обмотки возбуждения подключены к выходам возбудителя.

Направления токов во всех обмотках статора соответствуют указанному на рис. 1 мгновенному положению ротора генератора.

Осуществляя в функции положения ротора переключения токов в фазных обмотках возбуждения, обеспечивают пространственное круговое движение магнитодвижущей силы возбуждения вдоль окружности воздушного зазора машины так, что эта магнитодвижущая сила перемещается синхронно с вращающимся ротором генератора. Благодаря такому совместному вращательному движению ротора генератора и магнитодвижущей силы возбуждения достигается непрерывное возбуждение генератора в продольном направлении.

Схемы силовых цепей. Цепи рабочих обмоток могут быть выполнены как по общеизвестной трехфазной мостовой схеме, так и по схеме «звезда – обратная звезда» с уравнительным реактором. Хотя второй вариант и приводит к некоторому увеличению обмоточной меди, но при том же числе вентилях, что и в мостовой схеме, позволяет получить двойной выпрямленный ток при в два раза меньшем суммарном падении напряжения на

вентильях выпрямительной схемы, что актуально для электроэнергетических установок, имеющих малое напряжение бортовой сети, например, 12 или 28 В.

Цепи возбуждения могут быть выполнены так же, как типовые схемы силовых цепей вентиляльно-индукторных двигателей [5]. На рис. 2 обмотки включены по однополупериодной схеме: по обмоткам 1, 3 и 5 через ключи VT1, VT3 и VT5 проходят положительные полуволны фазных токов возбуждения, а по обмоткам 2, 4 и 6 через ключи VT2, VT4 и VT6 – отрицательные полуволны. Цепи обмоток возбуждения идентичны, поэтому на схеме (рис. 2) изображены только цепи обмоток 1 и 6. В цепи обмоток возбуждения 1...6, расположенных равномерно вдоль расточки статора и имеющих полный шаг, включены транзисторы VT1...VT6, которые образуют коммутатор (переключатель) фазных токов возбуждения генератора. Чтобы ротор намагничивался вдоль продольной оси и всегда в одном направлении, в функции угла поворота ротора открываются транзисторы тех фаз цепи возбуждения, обмотки которых расположены в данный момент времени напротив межполюсного промежутка ротора. Последовательно с цепями обмоток возбуждения включен транзистор VT, который работает в режиме широтно-импульсной модуляции и выполняет функции регулируемого источника тока возбуждения. Диоды VD, VD1, VD6 снижают коммутационные перенапряжения на силовых переходах транзисторов в прямом направлении.

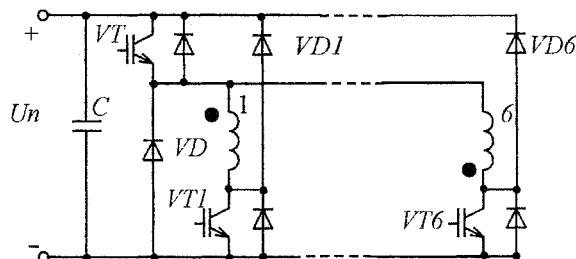


Рис. 2. Функциональная схема цепей возбуждения генератора

Возмущения в системе регулирования напряжения. Вал синхронного генератора механически связан с валом первичного двигателя внутреннего сгорания, угловая скорость которого может изменяться в диапазоне до 1:4 и более. Поддержание заданного значения напряжения осуществляется изменением тока возбуждения генератора. Наиболее трудно подавить обратные пульсации напряжения генератора.

Они обусловлены, прежде всего, неравномерным вращением вала из-за импульсного характера работы двигателя внутреннего сгорания. Амплитуда пульсаций скорости может достигать до 5 % в рабочем режиме двигателя и даже до 20 % и более при малых нагрузках. Другой причиной обратных пульсаций является неоднородность

магнитного сопротивления железа статора вдоль его расточки. Это связано с тем, что пакет железа статора шихтуется из листов холоднокатанной стали, которая имеет разную величину магнитной проницаемости вдоль и поперек направления прокатки. Экспериментальные измерения, выполненные на электрических машинах переменного тока мощностью 0,5...5,0 кВт и числом пар полюсов 1...3, указывают на уровень пульсаций в пределах 10...30 % от среднего значения напряжения. Наибольшие пульсации наблюдаются у электрических машин с малым числом пар полюсов.

Показатели контура регулирования напряжения. Подавление оборотных пульсаций традиционными $L-C$ фильтрами неэффективно, так как они рассчитаны на высокие (сотни Гц) частоты. Однако, как показывают экспериментальные данные, снятые на стенде, где в качестве генератора использовалась СРМНВ (0,25 кВт, 28 В, 6 А, 1500 об./мин) подавление оборотных пульсаций напряжения возможно осуществить средствами управления. Это подтверждают частотные характеристики контура регулирования напряжения (КРН), которые в разомкнутой системе (рис. 3, кривая 1) имеют полосу равномерного пропускания частот по сигналу задания не более 100 рад/с. В замкнутой же системе (рис. 3, кривая 2) удается расширить полосу пропускания частот до

800...1000 рад/с. На рис. 3б приведена амплитудная частотная характеристика контура регулирования напряжения по возмущению. Она имеет две ветки: восходящую (в диапазоне частот до $\omega \approx 300...400$ рад/с), где ослабление периодического воздействия осуществляется контуром регулирования напряжения, и спадающую (при более высоких частотах), где действие обратной связи уже неэффективно, а ослабление периодических возмущений возможно лишь $L-C$ фильтром в силовой цепи. В области экстремума величина динамической ошибки максимальна. Здесь обратная связь по напряжению из-за инерционности контура регулирования напряжения уже малоэффективна, а усиление влияния $L-C$ фильтра требует увеличения габаритов его элементов. Между тем, даже эти частоты ослабляются совместной работой КРН и фильтра в 30...50 раз.

Заключение. Простота конструкции обеспечивает высокую технологичность изготовления электрической машины, бесконтактное исполнение в сочетании с «холодным» не содержащим обмоток ротором повышает надежность работы подшипников и всей машины, возможность выполнить ротор массивным (т.е. полюса ротора и вал из одной цельной заготовки) существенно повышают его прочность и поперечную жесткость, что позволяет получать высокие угловые скорости

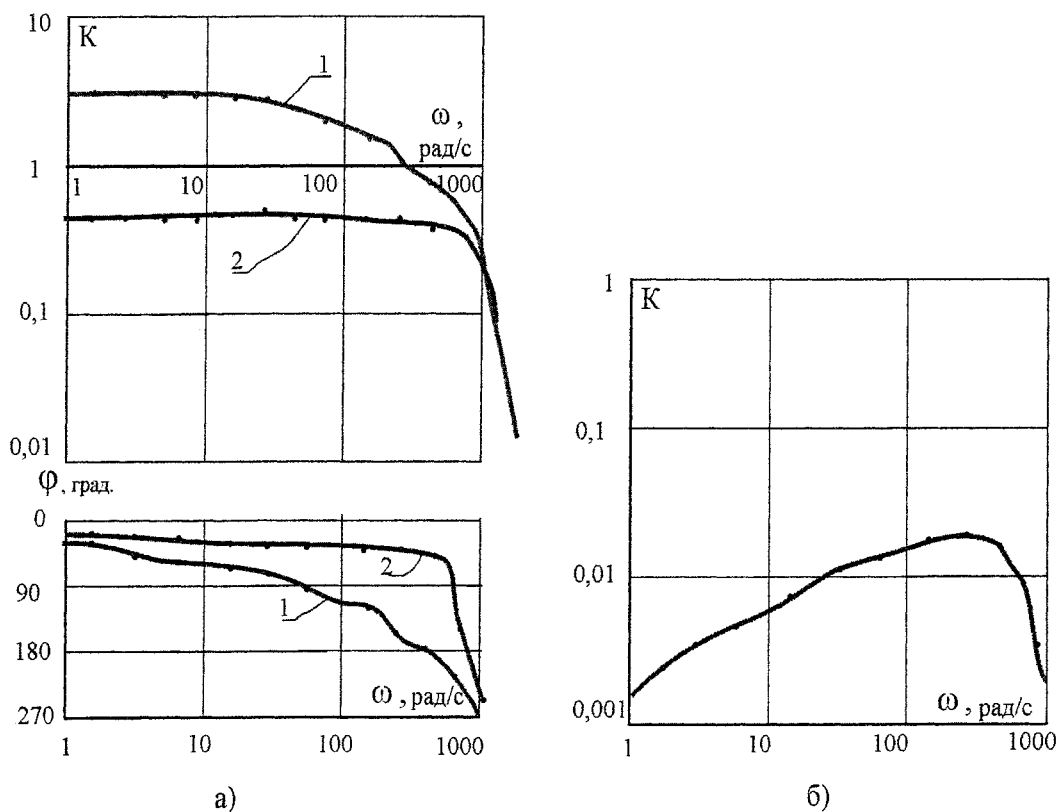


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики контура регулирования напряжения: а) по сигналу задания; б) по возмущению

и большие перегрузки по моменту. Малые мощности управления по цели возбуждения при достаточно высоком быстродействии этого канала способствуют достижению высокой точности поддержания заданного напряжения при благоприятных массо-габаритных показателях электроэнергетической установки.

Литература

1. Альпер, Н.Я. Индукторные генераторы / Н.Я. Альпер, А.А. Терзян. – М.: Энергия, 1970. – 192 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек: учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Патент 4121148 США, МКИ Н 02 К 19/34; Н 02 Р 9/14. Бесконтактный синхронный генератор. *Brushless synchronous generator system*; Hubert Platzer, Dipl.-Ing. Hitzinger & Co., Linz, Austria. – № 790263; заявл. 25.04.1977; опубл. 17.10.1978.

4. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования / под ред. М.Н. Фесенко. – М.: Машиностроение, 1992. – 381 с.

5. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

6. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4 (04). – С. 70–76.

7. Toliyat H., Xu L., Lipo T. Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28. – №3. – P. 559–667.

8. Weh H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output // Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig. – 1984. – Bd. 6. – P. 135–144.

Усынин Юрий Семенович в 1959 г. окончил Челябинский политехнический институт, в 1964 г. – очную аспирантуру при кафедре электропривода Московского энергетического института. Профессиональные интересы: металлургический, общепромышленный, автономный, следящий электроприводы. Доктор технических наук, профессор. Работает на кафедре электропривода ЮУрГУ.

Виноградов Константин Михайлович окончил в 2002 г. Южно-Уральский государственный университет, в 2005 г. – очную аспирантуру при кафедре ЭПА ЮУрГУ. Кандидат технических наук. Доцент кафедры электропривода ЮУрГУ.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА КРАНОВ С АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.Н. Нестеров, А.Н. Шишков
г. Челябинск, ЮУрГУ*

При использовании дроссельного регулируемого асинхронного электропривода для крановых подъемных механизмов возникают сложности при спуске легких грузов. Разработана система автоматического выбора и реализации силового или тормозного режимов спуска грузов с учетом изменения момента трения при трогании механизма и при изменении его скорости.

К электроприводам механизмов подъема кранов предъявляются требования по регулированию скорости. Как минимум необходимо иметь низкую скорость подъема (для выбора слабины канатов) и спуска (для создания посадочных скоростей) и высокую скорость для выполнения основной работы по подъему и спуску грузов. Такую задачу решает регулятор скорости тиристорный (РСТ) для дроссельного асинхронного электропривода, разработанный совместно специалистами Южно-Уральского государственного университета и ООО «Горнозаводское объединение» (г. Челябинск).

При использовании РСТ подъем груза с малой и высокой скоростями не вызывает никаких затруднений. Возникают сложности при спуске «легких» грузов или порожнего крюка. Под «легким» грузом понимается груз, который развивает активный момент на спуск меньше момента трения механизма подъема. Для спуска такого груза двигатель должен работать в двигательном режиме (силовой спуск). Для спуска груза, развивающего момент, превышающий момент трения, электродвигатель включается на подъем, но под действием груза двигатель вращается в направлении спуска. Происходит тормозной спуск груза с заданной скоростью, которая поддерживается РСТ. При этом электродвигатель работает в режиме торможения противовключением.

Решается задача автоматического выбора силового или тормозного режима спуска в зависимости от массы спускаемого груза. Машинист крана не должен задумываться об этих режимах. Он должен поставить командоаппарат в соответствующее положение спуска, а переключения силовой / тормозной режим должна обеспечивать автоматика.

Дроссельный асинхронный электропривод (рис. 1), реализующий регулирование скорости и автоматический выбор режима спуска, включает в себя реверсор РТ, переключающий статорные цепи асинхронного электродвигателя М1, дроссель (индуктивный реостат) L1...L3, регулятор скорости РСТ, датчик напряжения на кольцах ротора ДН, программируемый контроллер (микрокон-

троллер) ПК, командоаппарат КА и блок питания БП.

Обеспечение пуско-тормозных режимов осуществляется дросселем [1], создание пониженных скоростей – РСТ, реверс двигателя – реверсором тиристорным РТ, а управление реверсором и регулятором скорости осуществляется программируемым контроллером.

Командоаппарат в простейшем случае имеет пять положений: два положения П1 и П2 – на подъем, два положения С1 и С2 – на спуск и нулевое положение ОП. При необходимости нескольких пониженных скоростей на подъем и на спуск требуется введение дополнительных положений командоаппарата.

При включении электродвигателя на спуск груз начинает ускоряться (практически падать) под действием собственного груза и момента электродвигателя. Двигательный момент электродвигателя потребуется лишь при спуске легких грузов, не преодолевающих момент трения механизма. Для остальных грузов от электродвигателя требуется тормозной момент. Поэтому для уменьшения ударов в электроприводе при переключениях силовой/тормозной спуск и обратно двигательный момент электродвигателя при спуске легких грузов уменьшается отключением двух тиристорных регулятора с помощью реле К1 (рис. 1). Тогда по ротору в этом режиме протекает выпрямленный ток, а механические характеристики имеют вид V (рис. 2).

Программируемый контроллер ПК получает информацию о положении командоаппарата КА, о значении напряжения U_p на кольцах ротора электродвигателя М1. Анализируя полученную информацию, контроллер выдает управляющие команды вверх (В) или вниз (Н) на реверсор. Реверсор подключает статорную обмотку двигателя М соответственно для вращения электродвигателя на подъем или на спуск. На программируемый контроллер возлагаются также функции выдачи, в зависимости от сложившейся ситуации, уставок задания скорости электропривода на РСТ. Реле К1

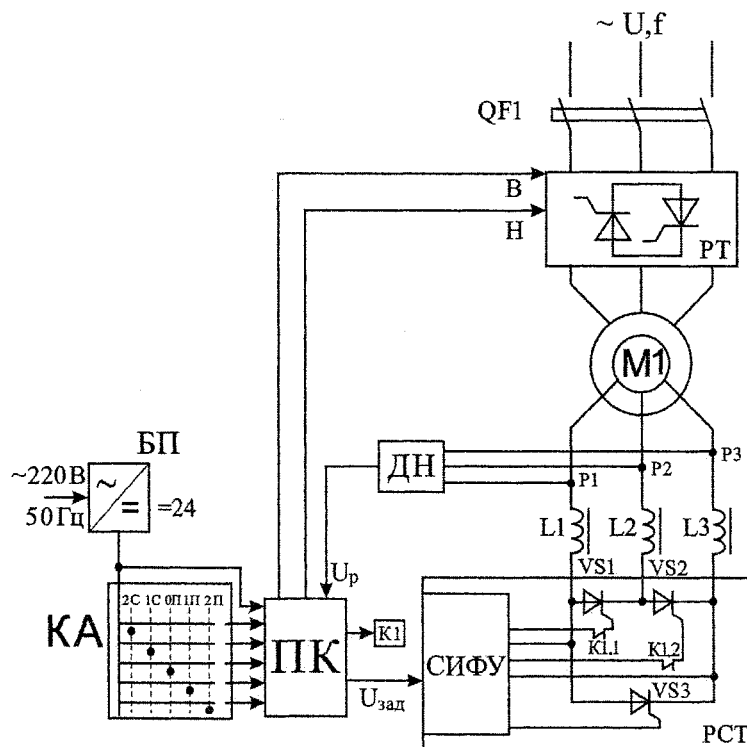


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

обеспечивает упомянутое выше отключение двух фаз ротора при силовом спуске.

Для обеспечения низких посадочных скоростей грузов и выборки слабины канатов при подъеме грузов в крановых механизмах подъема в простейшем случае реализуются механические характеристики, представленные на рис. 2. Своеобразный вид механических характеристик, известный как вид экскаваторных характеристик, обусловлен особенностями включенных в роторную цепь дросселей. Сопротивление этих дросселей зависит от частоты и величины тока по их обмоткам и поэтому автоматически изменяется при изменении частоты вращения ротора электродвигателя.

Характеристика I – естественная дроссельная механическая характеристика при включении статора двигателя на подъем. Характеристика II – искусственная дроссельная характеристика для медленного подъема груза (выборка слабины канатов при подъеме). Характеристика III – искусственная для медленного тормозного спуска груза. Характеристика IV – естественная дроссельная при включении статора двигателя на спуск. Характеристика V – для силового спуска на малой скорости. Зависимость VI – изменение момента трения $M_{тр}$ механизма при работе на подъем и на спуск.

На электропривод действует момент, создаваемый грузом $M_{ГР1}$, момент, создаваемый порожним крюком $M_{ГР2}$, и момент трения в механизме подъема крана $M_{тр}$. Момент $M_{тр}$ имеет реактивный характер, и, поэтому, его знак изменяется с изменением направления вращения электропривода.

При подъеме груза с ω_1 и малой ω_2 скоростями электродвигатель преодолевает суммарный момент $M_{ГР1} + M_{тр} + M_{ГР2}$. При спуске груза с посадочной скоростью ω_3 электродвигатель включен на подъем, но под действием разности моментов $M_{ГР2} + M_{ГР1} - M_{тр}$ работает в режиме торможения противовключением тормозной спуск).

Порожний крюк, развивающий активный статический момент $M_{ГР2}$, зачастую не в состоянии преодолеть момент трения $M_{тр0}$, развиваемый механизмом подъема, и спуск крюка на характеристике III с низкой посадочной скоростью проблематичен. Спуск порожнего крюка или с малым грузом приходится осуществлять в режиме силового спуска при работе электродвигателя в двигательном режиме в направлении спуска (со скоростью ω_4).

Однако, как показала практика, при работе с крановыми механизмами подъема, стоит только начать движение порожнего крюка вниз, как уменьшается момент трения $M_{тр}$, и становится возможным переход на тормозной спуск на характеристике III. Здесь «вмешивается» непостоянство момента трения кранового механизма, а, вернее, момент трогания механизма. Обзор литературы показал, что этот вопрос не простой, количественные данные практически отсутствуют, и приводятся лишь качественные зависимости [2]. При пуске $M_{тр}$ большой, а с ростом скорости он падает. На рис. 2 зависимость VI отражает качественное изменение момента трения при работе на подъем и на спуск.

Принцип автоматизации состоит в следую-

шем. Независимо от массы груза электродвигатель включается на силовой спуск. Если груз преодолевает момент трения, то система автоматизации осуществляет переключение электродвигателя в режим тормозного спуска (со скоростью ω_5).

В силовом спуске опускание груза происходит под действием двух моментов: момента, создаваемого двигателем, и момента, развиваемого грузом. Под действием этих моментов значительно увеличивается частота вращения двигателя в направлении спуска, система автоматизации контролирует эту ситуацию, и, если груз преодолевает момент трения, производит переключение реверсоров статорной цепи со спуска на подъем и работа двигателя осуществляется в режиме торможения противовключением. В режиме торможения

возможно уменьшение скорости спуска груза и стремление от скорости ω_5 к остановке электродвигателя. Для исключения остановки электродвигателя система переключит двигатель с режима противовключения вновь на силовой спуск. Поэтому груз с небольшой массой будет опускаться попеременно то в силовом, то в тормозном режимах. При этом спуск легкого груза происходит с колеблющейся скоростью.

На рис. 3 представлены осциллограммы момента и скорости привода при лабораторных испытаниях системы автоматизации с электродвигателем 3,5 кВт. Лабораторная установка позволяет реализовать необходимые режимы работы.

Участок 1 – пуск двигателя (подъем) и затем снятие напряжения задания скорости и торможение

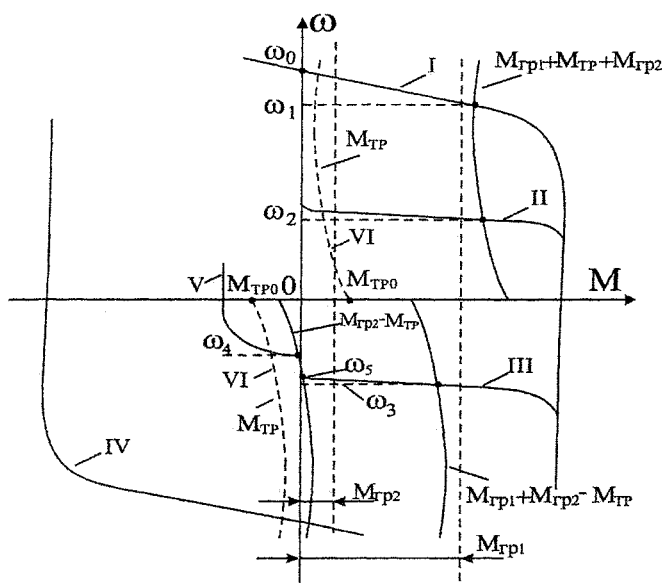


Рис. 2. Механические характеристики кранового механизма подъема

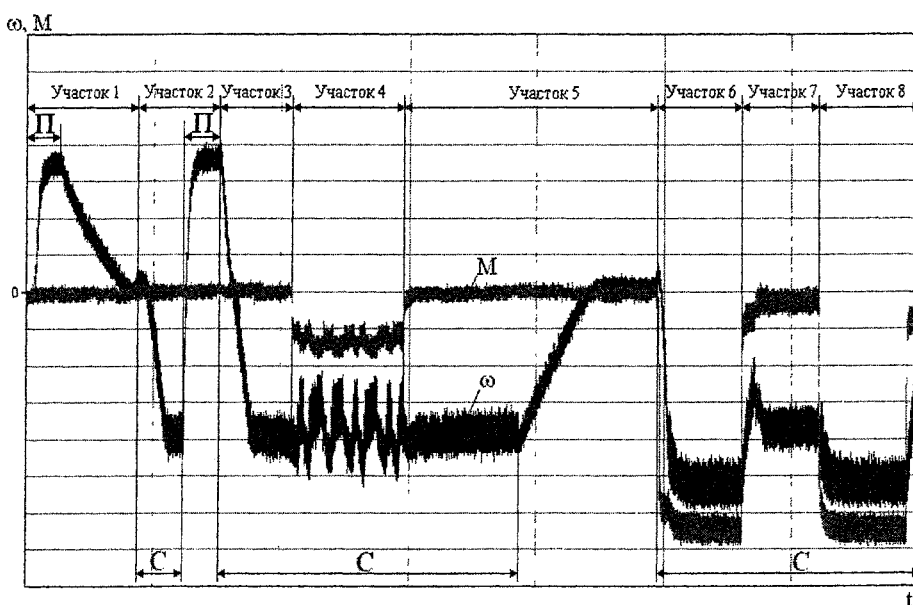


Рис. 3. Осциллограммы момента и скорости привода

на выбеге. На участке 2 пуск двигателя в обратном направлении (спуск), после чего осуществляется реверс. После второго реверса и работы привода в установившемся режиме (участок 3) прикладывается незначительная нагрузка, имитирующая момент, создаваемый «легким» грузом (участок 4). Как видно из осциллограмм, при этом происходят переключения реверсоров статорной цепи, что вызывает незначительное изменение скорости, но при неизменном спуске груза. После снятия момента происходит переключение режима спуска на силовой и затем торможение на выбеге (участок 5). На участке 6 одновременно с включением двигателя на спуск прикладывается значительный момент («тяжелый» груз), и осуществляется спуск груза в тормозном режиме. После снятия момента (участок 7) происходит переключение на силовой спуск и работа в этом режиме. Повторный бросок момента вызывает переключение реверсоров, обеспечивающих реверс, и спуск груза вновь осуществляется в тормозном режиме (участок 8).

Буквами П и С обозначены моменты времени,

когда командоаппарат стоит соответственно в положениях ПП и ПС.

Способ автоматизации успешно испытан в лаборатории. В качестве ПК использовался программируемый микроконтроллер ATmega 8535.

Таким образом, предложенный способ автоматизации позволяет решить проблему спуска «легкого» груза.

Литература

1. Пусковые характеристики дроссельного асинхронного электропривода / Борисов А.М, Драчев Г.И., Лях Н.Е., Ильинов В.И. // Вестник ЮУрГУ Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – №4. – С. 89–93.
2. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1977
3. Фомин, С.А. Автоматизация дроссельного асинхронного электропривода кранового механизма подъема / С.А. Фомин // Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. – Вып. 9 – Магнитогорск: МГТУ, 2004.

Борисов Александр Михайлович, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент.

Драчев Геннадий Иванович, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент.

Лях Николай Ефимович, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент.

Нестеров Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ.

Шишков Александр Николаевич, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ П-ОБРАЗНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭВМ

*К.Е. Горшков, Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов
г. Челябинск, ЮУрГУ*

Рассмотрено применение П-образных схем замещения трансформаторов, показаны достоинства и недостатки. Описана методика их использования в программе расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий на ЭВМ.

Согласно руководящим указаниям по расчету токов короткого замыкания (КЗ) погрешность в расчетах не должна превышать 5–10 % [1]. Данная погрешность обусловлена целым рядом допущений: упрощенный расчет по шкале средних номинальных напряжений сетей, учет только реактивных сопротивлений элементов и т.д. Допущения ориентированы на расчеты, проводимые вручную, и введены в целях экономии времени и средств.

Расчет токов короткого замыкания необходим для выбора и проверки электрооборудования и уставок РЗА по условиям КЗ. Если при выборе электрооборудования наличие погрешности в определенной мере нивелируется завышением результатов расчетов в условиях дискретности шкалы номиналов оборудования, то вопрос снижения погрешности в расчетах для РЗА является актуальным, так как точность настройки, в первую очередь цифровых устройств, напрямую зависит от точности расчета токов КЗ.

Применение ЭВМ позволяет не только уменьшить затраты времени, но параллельно с этим повысить точность расчетов, исключив ряд допущений.

Одним из основных допущений является расчет по шкале средних номинальных напряжений сетей. Отказаться от данного допущения можно, применив П-образные схемы замещения трансформаторов [2]. Ниже описан алгоритм применения П-образных схем замещения трансформаторов в разрабатываемой программе по расчету токов короткого замыкания в электроэнергетических системах.

П-образные схемы замещения трансформаторов прямой и обратной последовательности. Как известно, П-образная схема замещения трансформатора сохраняет трансформаторные связи и при соединении обмоток по схеме Y/Y позволяет получить натуральные (действительные величины в именованных единицах) токи и напряжения на обеих сторонах трансформатора [2]. В основе П-образной схемы замещения лежит резо-

нансный треугольник (сумма его сопротивлений равна нулю), поэтому расчет должен проводиться на ЭВМ для достижения требуемой точности.

Достоинства П-образных схем замещения:

- расчет схем в именованных единицах;
- при учете регулирования напряжений обмоток трансформатора необходимо пересчитать только сопротивления П-образной схемы замещения;
- расчет схем с параллельно работающими трансформаторами с разными коэффициентами трансформации.

Недостатки П-образных схем замещения:

- не учитывается ветвь намагничивания трансформатора (принимается $X_{\mu 1} = \infty$);
- схемы замещения справедливы для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y(Y0)/Y(Y0), D/D и Y(Y0)/Y(Y0)/Y(Y0), D/D/D.

На рис. 1 показаны П-образные схемы замещения трансформаторов, используемые в программе при формировании схемы замещения сети прямой и обратной последовательности. В отличие от предложенных в работе [2] изображенные схемы оптимизированы для применения в матричных расчетах на ЭВМ. Так, схема замещения двухобмоточного трансформатора не содержит собственных узлов, а трехобмоточного трансформатора имеет только один собственный узел. При этом сокращение количества узлов позволяет сохранить быстродействие в программах, использующих прямые методы матричного расчета.

Ниже приведен алгоритм составления схемы замещения сети с использованием П-образных схем.

1. В ходе формирования схемы замещения прямой или обратной последовательности трансформаторы следует представить схемами рис. 1. Для автотрансформатора и автотрансформаторной группы в данном случае может быть использована схема замещения трехобмоточного трансформатора.

При выборе направлений ветвей графа топологии схемы замещения следует указывать направления токов ветвей (рис. 1).

2. Расчет сопротивлений должен проводиться в именованных единицах. На рис. 1:

Z_T – сопротивление двухобмоточного трансформатора, приведенное к напряжению высшей стороны;

Z_B, Z_C, Z_H – сопротивления обмоток ВН, СН и НН, приведенные каждое к своему напряжению.

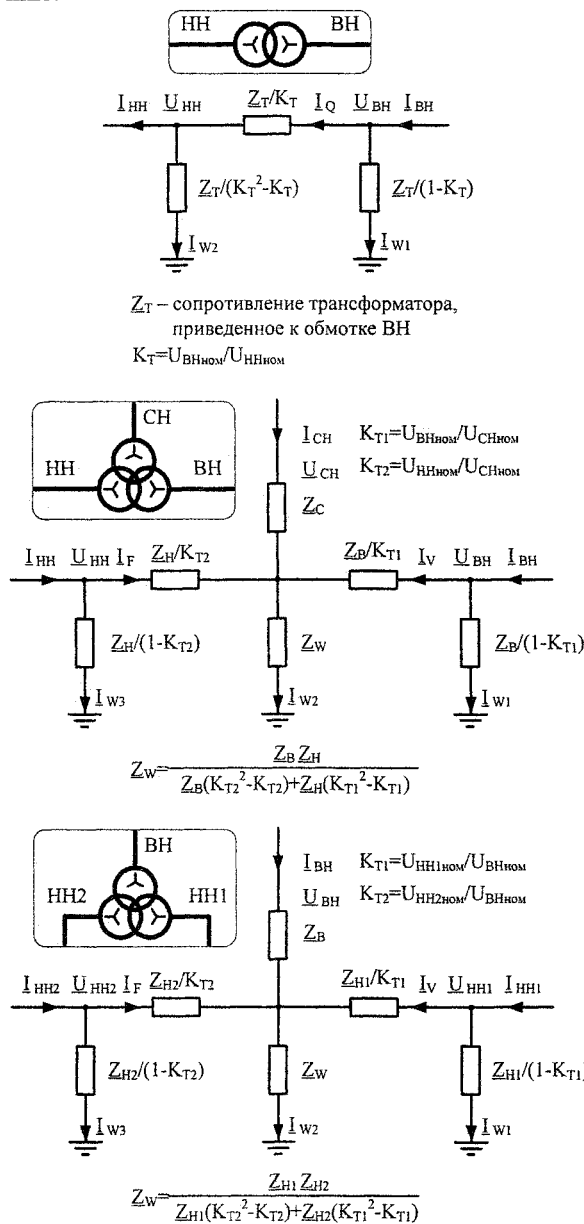


Рис. 1. П-образные схемы замещения трансформаторов прямой и обратной последовательности

Если учитывается регулирование напряжения, то следует предварительно пересчитать коэффициенты трансформации и сопротивления обмоток трансформатора с учетом отпайки РПН.

3. Расчет натуральных токов в обмотках трансформаторов проводится после расчета токов ветвей схемы замещения.

Двухобмоточный трансформатор:

$$\underline{I}_{ВН} = \underline{I}_Q + \underline{I}_{W1}, \quad \underline{I}_{НН} = \underline{I}_Q - \underline{I}_{W2}. \quad (1)$$

Трехобмоточный трансформатор:

$$\underline{I}_{ВН} = \underline{I}_V + \underline{I}_{W1}, \quad \underline{I}_{НН} = \underline{I}_F + \underline{I}_{W3}. \quad (2)$$

Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения:

$$\underline{I}_{НН1} = \underline{I}_V + \underline{I}_{W1}, \quad \underline{I}_{НН2} = \underline{I}_F + \underline{I}_{W3}. \quad (3)$$

П-образная схема замещения трансформатора не позволяет получить реальные значения фаз токов и напряжений, если одна обмотка трансформатора соединена в звезду, а другая в треугольник (невозможность получения схемы замещения в виде электрического контура для трансформатора со схемой соединения обмоток Y(Y0)/D показана в [3]). В этом случае можно применить следующий алгоритм упрощенного учета фазоповорота трансформаторов.

1. Для всех трансформаторов принимаются схемы замещения по рис. 1 независимо от схемы соединения обмоток.

2. На этапе формирования матрицы узловых токов проводится корректировка начальных фаз источников:

- если источник отделен от точки КЗ трансформатором Y/D и расположен со стороны Y, то к его начальной фазе следует добавить +30 эл. град;
- если источник отделен от точки КЗ трансформатором Y/D и расположен со стороны D, то к его начальной фазе следует добавить -30 эл. град;
- в остальных случаях добавка 0 эл. град.

Для источника, расположенного за N каскадами трансформаторов следует вычислять добавку к начальной фазе суммированием значений, двигаясь от точки КЗ к источнику.

3. Значения фаз токов и напряжений прямой и обратной последовательности, полученные в ходе расчета для участка сети той ступени трансформации, где произошло КЗ, будут соответствовать натуральным, для остальных участков – отличаться соответственно на ±30 эл. град.

Следует отметить, что при использовании данного алгоритма напряжения одной ступени на выводах трансформаторов генерирующих источников должны быть синфазные.

П-образные схемы замещения трансформаторов нулевой последовательности. Конфигурация схемы замещения сети нулевой последовательности зависит от схем соединения обмоток трансформаторов. Схему замещения сети нулевой последовательности можно получить из схемы замещения прямой последовательности, внося корректировки в П-образные схемы замещения трансформаторов. Данный подход также позволит сократить длительность расчета и сэкономить ресурсы ЭВМ за счет упрощения алгоритмов.

В табл. 1 приведены унифицированные схемы замещения двухобмоточного трансформатора нулевой последовательности, полученные из П-образной схемы замещения прямой последовательности (рис. 1).

Формирование схемы замещения сети осуществляется в два этапа.

1. Копируется матрица соединений графа схемы замещения прямой последовательности. Затем для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y0/Y(D) и Y(D)/Y0 вносится изменение для ветви Z_Q согласно стрелкам на схемах табл. 1:

- для трансформаторов Y0/Y(D) продольная ветвь Z_Q преобразуется в поперечную смещением из узла $\underline{U}_{НН}$ в нулевой узел схемы;
- для трансформаторов Y(D)/Y0 продольная ветвь Z_Q преобразуется в поперечную смещением из узла $\underline{U}_{ВН}$ в нулевой узел схемы.

2. Формируется матрица сопротивлений ветвей схемы замещения нулевой последовательности. При этом применяется алгоритм для схемы замещения прямой последовательности, но с использованием формул из табл. 1.

Расчет натуральных токов нулевой последовательности обмоток трансформаторов осуществляется по выражениям (1), (2) и (3).

Особенности представленных схем:

- схемы справедливы для КЗ как на стороне ВН, так и на стороне НН, что позволяет не рассматривать положение точки КЗ при анализе обмоток;
- расчет натуральных токов аналогичен схемам прямой последовательности, что позволяет использовать один алгоритм расчета натуральных токов для всех последовательностей;
- схемы унифицированы со схемами замещения прямой последовательности, что упрощает формирование схемы замещения сети и позволяет использовать одни и те же алгоритмы.

Для трехобмоточного трансформатора схемы

Таблица 1

Схемы замещения двухобмоточного трансформатора нулевой последовательности

Схема замещения нулевой последовательности	Схема соединения обмоток	Расчет сопротивлений
	Y/Y	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	Y/D	
	D/Y	
	D/D	
	Y0/Y0	$Z_Q = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{K_T}$, $Z_{WB} = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{1 - K_T}$, $Z_{WH} = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{K_T^2 - K_T}$
	Y0/Y	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	Y0/D	$Z_Q = \frac{Z_{NB} + Z_T}{K_T}$, $Z_{WB} = \frac{Z_{NB} + Z_T}{1 - K_T}$, $Z_{WH} = \infty$
	Y/Y0	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	D/Y0	$Z_Q = \frac{Z_{NH} K_T^2 + Z_T}{K_T}$, $Z_{WB} = \infty$, $Z_{WH} = \frac{Z_{NH} K_T^2 + Z_T}{K_T^2 - K_T}$

Примечания: 1. Z_T – сопротивление трансформатора, приведенное к обмотке ВН.

2. $K_T = U_{ВНном} / U_{ННном}$.

3. Z_{NB} – сопротивление в нейтрали обмотки ВН.

4. Z_{NH} – сопротивление в нейтрали обмотки НН.

5. Принимается $X_{\mu 0} = \infty$.

замещения нулевой последовательности представлены в табл. 2. Если трансформатор имеет схему соединения обмоток, не указанную в таблице, то схему замещения можно получить самостоятельно преобразованием продольных ветвей в поперечные.

Если в нейтрали автотрансформатора установлено сопротивление, то в этом случае следует использовать схему, учитывающую электрическую связь между обмотками ВН и СН [4]. На рис. 2 показана схема замещения нулевой последовательности

Таблица 2

Схемы замещения трехобмоточного трансформатора нулевой последовательности

Схема замещения нулевой последовательности	Схема соединения обмоток	Расчет сопротивлений
	Y/Y/Y	$Z_V=Z_E=Z_F=\infty, Z_{W1}=Z_{W2}=Z_{W3}=\infty$
	Y0/Y0/Y0	$Z_V=\frac{Z_{NB}+Z_B}{K_{T1}}, Z_E=Z_{NC}+Z_C, Z_F=\frac{Z_{NH}+Z_H}{K_{T2}},$ $Z_{W1}=\frac{Z_{NB}+Z_B}{1-K_{T1}}, Z_{W3}=\frac{Z_{NH}+Z_H}{1-K_{T2}},$ $Z_{W2}=\frac{(Z_{NB}+Z_B)(Z_{NH}+Z_H)}{(Z_{NB}+Z_B)(K_{T2}^2-K_{T2})+(Z_{NH}+Z_H)(K_{T1}^2-K_{T1})}$
	Y/Y0/Y0	$Z_{W2}=\frac{Z_{NH}+Z_H}{K_{T2}^2-K_{T2}}$
	Y0/Y0/Y	$Z_{W2}=\frac{Z_{NB}+Z_B}{K_{T1}^2-K_{T1}}$
	D/D/D	$Z_V=\frac{Z_B}{K_{T1}}, Z_E=Z_C, Z_F=\frac{Z_H}{K_{T2}},$ $Z_{W1}=Z_{W3}=\infty,$ $Z_{W2}=\frac{Z_B Z_H}{Z_B(K_{T2}^2-K_{T2})+Z_H(K_{T1}^2-K_{T1})}$

- Примечания: 1. $K_{T1}=U_{ВНном}/U_{СНном}, K_{T2}=U_{ННном}/U_{СНном}$.
 2. Z_{NB} – сопротивление в нейтрали обмотки ВН.
 3. Z_{NC} – сопротивление в нейтрали обмотки СН.
 4. Z_{NH} – сопротивление в нейтрали обмотки НН.
 5. Принимается $X_{\mu 0}=\infty$.

Например, схема замещения трехобмоточного трансформатора Y0/Y0/D получается из первой схемы табл. 2 путем смещения ветви Z_F из узла $U_{НН}$ в нулевой узел схемы, а сопротивления ветвей Z_F, Z_{W2}, Z_{W3} подлежат пересчету:

$$Z_F = Z_H / K_{T2}, Z_{W3} = \infty,$$

$$Z_{W2} = \frac{(Z_{NB} + Z_B)Z_H}{(Z_{NB} + Z_B)(K_{T2}^2 - K_{T2}) + Z_H(K_{T1}^2 - K_{T1})}$$

Для трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения схемы получаются по аналогии с трехобмоточным трансформатором.

Для автотрансформатора и автотрансформаторной группы с глухим заземлением нейтрали со стороны обмоток ВН и СН используются схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора (табл. 2).

довательности для автотрансформатора со схемой соединения обмоток Y0/Y0/D и сопротивлением в нейтрали Z_{NBC} .

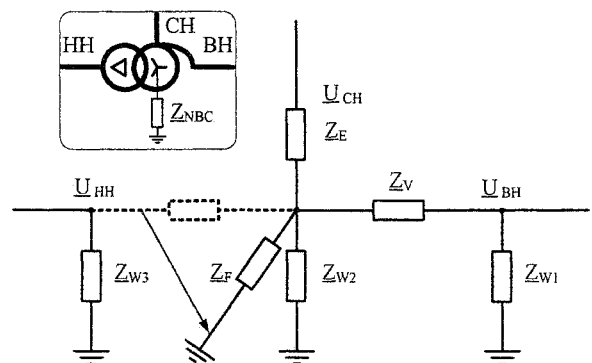


Рис. 2. Схема замещения автотрансформатора Y0/Y0/D нулевой последовательности

В схеме сопротивления определяются следующим образом:

$$\underline{Z}_V = \underline{Z}_B + K_{ТВ-Н} \cdot (K_{ТВ-Н} - K_{ТС-Н}) \cdot \underline{Z}_H,$$

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_C + K_{ТС-Н} \cdot (K_{ТС-Н} - K_{ТВ-Н}) \cdot \underline{Z}_H,$$

$$\underline{Z}_F = \underline{Z}_{NBC} + K_{ТВ-Н} \cdot K_{ТС-Н} \cdot \underline{Z}_H,$$

$$\underline{Z}_{W1} = \underline{Z}_{W2} = \underline{Z}_{W3} = \infty,$$

$$K_{ТВ-Н} = U_{ВНном} / U_{ННном},$$

$$K_{ТС-Н} = U_{СНном} / U_{ННном}.$$

Подводя итоги вышесказанному можно сделать следующие **выводы**.

1. Разработан алгоритм применения П-образных схем замещения трансформаторов прямой обратной и нулевой последовательности, позволяющий применять прямые матричные методы расчета схем с реальными коэффициентами трансформации.

2. Получены П-образные схемы замещения прямой и обратной последовательности, оптимизированные для матричного расчета на ЭВМ, а также П-образные схемы нулевой последователь-

ности, позволяющие упростить алгоритмы программы.

3. Предложен алгоритм упрощенного учета фазоповорота трансформаторов при использовании П-образных схем замещения.

Литература

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2002. – 152 с.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
3. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С. Бернас, З. Цёк // Пер. с польск. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
4. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.–Л.: Изд-во «Энергия», 1964. – 704 с.

Горшков Константин Евгеньевич, выпускник кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, специальность «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Коровин Юрий Витальевич, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент. Окончил в 1982 г. ЧПИ по специальности «Электрические станции». Область научных исследований связана с переходными процессами в электроустановках и преобразовательной техникой.

Пахомов Евгений Игоревич, старший преподаватель кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. В 2002 году окончил ЮУрГУ по специальности «Электрические системы и сети». Направление научной деятельности – переходные процессы в электроэнергетических системах, силовая электроника, математическое моделирование.

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА УСТАВОК РЕЗЕРВНЫХ ЗАЩИТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110–220 кВ

В.М. Тарасенко

г. Челябинск, ЧРДУ СО ЦДУ ЕС России

Рассмотрена существующая методика расчета уставок устройств РЗА в сетях сложной конфигурации (110 кВ и выше) и выявлены причины, приводящие к большим трудозатратам на выполнение данных расчетов. Новый подход к выполнению расчетов уставок резервных защит в сетях 110–220 кВ требует разработки специального программного комплекса, в котором формализована процедура принятия решение об изменении взаимосвязанных уставок резервных защит всех элементов узла энергосистемы.

Вопреки общепринятому мнению определение параметров срабатывания (уставок) устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в электрических сетях сложной конфигурации (110 кВ и выше) в общем случае не является просто расчетом по заданным алгоритмам и формулам, так как кроме собственно расчета он включает в себя принятие решения о выборе той или иной уставки из нескольких рассчитанных. Причем достаточно часто все рассчитанные варианты уставок являются плохими, то есть каждый из вариантов имеет некоторые недостатки, которых в идеале хотелось бы избежать. Но так как хорошего варианта (без недостатков) обычно нет, то приходится выбирать один вариант решения из нескольких плохих. Следовательно, правильнее говорить не о расчете, а о выборе уставок устройств РЗА или принятии решений об уставках устройств РЗА.

Обычно решение о принятии той или иной уставки, не совсем соответствующей нормативно-техническим требованиям, принимается человеком (расчетчиком), исходя из опыта данного человека и из его понимания, что такое хорошо и что такое плохо в экспертной оценке.

Поэтому складывается впечатление, что задачу выполнения расчета уставок устройств РЗА в сложной электрической сети практически невозможно решить с использованием только компьютера с комплексом специальных программ без участия человека-расчетчика-эксперта. Компьютер может достаточно быстро и достаточно точно просчитать большое количество вариантов уставок устройств РЗА, что не под силу выполнить ни одному человеку. Но компьютер не может принять правильного решения о том, какую конкретно уставку надо (или можно) принять, когда среди всех рассчитанных вариантов нет ни одного хорошего, удовлетворяющего всем нормативно-техническим требованиям.

В настоящее время имеется достаточно много хороших и разных программ для расчета уставок устройств РЗА в электрических сетях. Но все эти программы построены принципиально одинаково: они рассчитывают уставки устройств РЗА по заданным алгоритмам (формулам) с учетом опреде-

ленных требований (условий) и ограничений. Если в результате работы программы получается решение, удовлетворяющее всем заданным условиям, то найденные установки принимаются к реализации. А если одновременное выполнение всех заданных условий невозможно (некоторые условия противоречат друг другу, и выполнение одного условия приводит к нарушению другого условия), то программа никакого решения принять не может.

Поэтому в настоящее время методика расчета уставок устройств РЗА в сетях сложной конфигурации (110 кВ и выше) выглядит примерно так: расчетчик задает компьютеру конкретные задания на выполнение конкретных расчетов. Компьютер просчитывает все заданные варианты и выдает результаты расчетчику, который на их основе принимает решения о принятии тех или иных уставок. И даже если среди рассчитанных вариантов нет ни одного хорошего решения, человек-расчетчик все равно какое-то решение примет.

В настоящее время в России основную часть расчетов уставок устройств РЗА электрических сетей 110–220 кВ, как правило, выполняют отделы расчетов служб РЗА региональных диспетчерских управлений (РДУ) РАО «ЕЭС России». Расчеты выполняются на современных персональных компьютерах с использованием специализированных программных комплексов, таких как ТКЗ-3000 и АРМ СРЗА (г. Новосибирск, ПК «Бриз», разработчик Черняков В.Н.), IEDKK (Киевский институт электродинамики НАНУ, разработчик Крылов В.А.) и др. Несмотря на это, трудоемкость выполнения расчетов очень велика. Основные причины этого:

Причина 1. Уставки многих устройств РЗА в электрических сетях взаимосвязаны (защиты согласованы друг с другом). В сетях сложной конфигурации практически никогда не удается изменить уставку одного устройства РЗА без изменения уставок других устройств РЗА. Поэтому любое существенное изменение конфигурации сети (например, включение новой подстанции), как правило, приводит к необходимости перерасчета уставок многих устройств РЗА.

Обычно схема сети 110–220 кВ достаточно крупной энергосистемы разделяется на несколько

узлов. Каждый узел состоит из нескольких десятков подстанций, связанных между собой линиями электропередачи. Кроме того, каждый узел связан линиями электропередачи и автотрансформаторами с несколькими другими узлами, образуя единую энергосистему. Поэтому разделение энергосистемы на несколько узлов является достаточно условным, но удобным, в частности, для выполнения расчетов уставок устройств РЗА.

При этом любое существенное изменение конфигурации узла (например, включение новой подстанции или даже реконструкция одной линии с изменением ее параметров), как правило, приводит к необходимости перерасчета уставок устройств РЗА всего узла. И более того, изменения уставок устройств РЗА одного узла влекут за собой соответствующие изменения уставок устройств РЗА соседних узлов.

При этом одной из задач расчета уставок устройств РЗА узла является сохранение (по возможности) неизменными уставок устройств РЗА соседних узлов. То есть, при расчете уставок устройств РЗА одного узла желательно принять такие решения, которые позволили бы изменить уставки устройств РЗА только данного узла, не распространяя изменения на соседние узлы. Иначе объем расчетов многократно увеличится.

Причина 2. Существующая сегодня методика расчета уставок устройств РЗА, при которой для выбора уставки одной из защит выполняются варианты расчеты уставок, а расчетчик принимает решение о том, какую из рассчитанных уставок принять. После этого из-за изменения данной уставки возникает необходимость изменения другой уставки. Опять на компьютере выполняется несколько десятков расчетов, расчетчик опять принимает решение и так до тех пор, пока не будут пересчитаны уставки всех устройств РЗА, согласованных друг с другом.

При этом расчет уставок устройств РЗА узла сети разделяется на три основных, практически не зависящих друг от друга, расчета:

1. Расчет основных защит от всех видов коротких замыканий (КЗ): высокочастотных защит линий, дифференциальных защит автотрансформаторов, дифференциальных защит шин, дифференциальных защит ошинок и др.

2. Расчет резервных дистанционных защит (ДЗ) от междуфазных КЗ линий и автотрансформаторов связи.

3. Расчет резервных токовых направленных защит нулевой последовательности (ТНЗНП) от КЗ на землю линий и автотрансформаторов связи.

Расчет основных защит выполняется наиболее просто, так как каждая основная защита рассчитывается отдельно от других, и изменение ее уставок не приводит к необходимости перерасчета уставок других устройств РЗА.

Расчеты резервных защит (ДЗ и ТНЗНП) выполняются гораздо более сложно, так как все ДЗ

согласованы между собой и все ТНЗНП согласованы между собой, и изменение какой либо уставки одной защиты может повлечь за собой необходимость перерасчета всех ДЗ или всех ТНЗП всего узла. Для существенного уменьшения трудозатрат на выполнение расчетов уставок устройств РЗА в сетях 110–220 кВ необходимо изменение существующего подхода к расчету уставок резервных защит (ДЗ и ТНЗНП).

Компьютер должен не просто выполнять варианты расчеты уставок устройств РЗА, а принимать решения об уставках устройств РЗА. Причем, решения должны приниматься даже в том случае, если хороших решений (удовлетворяющих всем поставленным условиям) вообще нет. То есть, компьютер должен уметь выбирать наилучшее решение из всех плохих решений.

При этом методика расчета уставок резервных защит (ДЗ или ТНЗНП) узла может выглядеть следующим образом: расчетчик формирует задание компьютеру не на расчет отдельной ступени защиты, а на выбор уставок всех резервных защит (ДЗ или ТНЗНП) всего узла с указанием приоритетных критериев. Компьютер выполняет расчет уставок всех защит узла с принятием некоторых решений по каждой из уставок каждой ступени защиты и выдает результат в виде всех уставок всех защит узла с перечнем принятых им отклонений от заданных условий и от нормативно-технических требований. Расчетчик может оценить все принятые компьютером решения в целом (экспертная оценка, без выполнения расчетов) и, если результат его не устраивает, задать повторный расчет резервных защит узла с другими приоритетными критериями. При этом надо только учитывать, что выбрать уставки резервных защит всего узла абсолютно правильно, без отклонений от нормативно-технических требований практически нереально, и не надо заставлять компьютер бесконечно пересчитывать уставки резервных защит узла с разными приоритетными критериями.

Особенностью расчета уставок резервных защит узла является его многовариантность: если представить себе, что два расчетчика независимо друг от друга выполнили расчеты уставок ДЗ одного и того же узла, то почти со стопроцентной вероятностью у них получатся разные результаты. Аналогично, если один расчет выполнит человек, а второй расчет выполнит компьютер – результаты получатся различные. И вопрос о том, какой расчет правильный, а какой – нет, наверное, является некорректным: оба расчета имеют какие-то недостатки. Просто разные расчетчики (человек или компьютер) при невозможности принять хорошее решение принимали разные варианты плохих решений. Следовательно, расчет уставок дистанционных защит узла, выполненный компьютером, нельзя однозначно назвать правильным или неправильным: это просто один из возможных вариантов решения поставленной задачи. Поиск опти-

мальных уставок возможен на основе методов многокритериальной оптимизации в зоне компромиссных решений.

Вывод. Для существенного уменьшения трудозатрат на выполнение расчетов уставок устройств РЗА в сетях 110–220 кВ необходимо изменение существующего подхода к расчету уставок резервных защит (ДЗ и ТНЗНП).

Необходима разработка специального программного комплекса, с использованием которого компьютер будет не просто выполнять вариантыные расчеты отдельных уставок устройств РЗА, а будет самостоятельно принимать решения об изменении всех взаимосвязанных уставок резервных защит всех элементов (линий и автотрансформаторов) узла энергосистемы.

Тарасенко Владимир Михайлович окончил ЧПИ в 1980 г. по специальности «Электрические станции», работает зам. начальника службы РЗА ЧРДУ. Научные интересы связаны с релейной защитой и автоматикой энергосистем.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМНОЙ АВАРИИ В КРУПНОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ЭНЕРГОУЗЛЕ

*И.Ю. Шумаков***, *М.Е. Гольдштейн**, *Н.П. Серов***
*г. Челябинск, *ЮУрГУ, **ЧРДУ*

Приведены примеры нескольких системных аварий и их последствий. Одним из путей локализации развивающейся системной аварии является предупреждающее выделение ограниченного энергоузла с местными электростанциями на автономную работу с контролем баланса активных и реактивных мощностей как в предаварийном режиме, так и во время развития аварии и после отделения от внешней электрической сети. Определены организационно-технические и технологические мероприятия по координации баланса мощностей, позволяющие обеспечить в выделяющемся энергорайоне устойчивую работу электростанций на сбалансированную нагрузку.

Единая энергетическая система (ЕЭС) России сформировалась из крупных объединенных энергосистем (ОЭС), которые, в свою очередь, появились в результате объединения через межсистемные магистральные линии электропередачи (ЛЭП) 110–750 кВ на параллельную работу ряда изолированных бездефицитных энергосистем (ЭС). Опыт параллельной работы энергообъектов на протяжении более 50 лет выявил как сильные, так и слабые стороны функционирования ЕЭС. Характерными среди недостатков функционирования ЕЭС оказались случаи возникновения и развития системных аварий в масштабах ЭС.

При возникновении в энергосистемах аварий, например, таких как потеря крупного энергоблока на электростанции или посадка станции на «нуль», отключение одной или нескольких межсистемных связей, централизованная ПА в составе ЦАРЧМ, САРЧМ, АЧР, АРЛ, АСН фиксирует моменты опасного отклонения «стратегических» режимных параметров, контролирует состояние объектов энергосистем, определяет тяжесть нарушения нормального режима и вырабатывает соответствующие управляющие воздействия на объекты управления [1]. Таким образом сохраняется надежная и устойчивая работа отдельных ОЭС и ЕЭС в целом.

При создании ЕЭС в конце 60-х – начале 70-х годов XX века ряд зарубежных и некоторых отечественных специалистов отстаивали убеждения об обязательном секционировании энергообъединений (ЭС, ОЭС) или о необходимости ограничения развития энергообъединений на переменном токе из-за неизбежной ограниченной пропускной способности межсистемных связей относительно мощности объединяемых частей ЕЭС с целью последующего автоматического выделения некоторых энергообъединений на автономную работу со сбалансированной генерирующей нагрузкой электростанций ЭС (ОЭС) и нагрузкой потребителей по условиям сохранения устойчивости и «живучести» отдельных выделившихся ЭС (ОЭС) [2].

Со временем ЕЭС СССР превращалась в «самую крупную в мире кибернетическую систему» [3], занимающую большую территорию Европы и Азии, и тем не менее, во всех планах развития энергетики страны для предотвращения развития системных аварий предусматривалась сеть меридиональных и широтных передач постоянного тока (ППТ). Эти ППТ разделяют отдельные энергосистемы на относительно автономную работу с независимыми частотами переменного тока и обменными перетоками только по активной мощности и позволяют во время возникновения, развития и устранения аварии обеспечить быстрое действующее технологическое управление перетоками активной мощности по межсистемным ППТ при соблюдении должных эксплуатационных значений по частоте и уровням напряжений в узловых точках энергосистем.

Системные аварии в ЕЭС развиваются, как правило, по индивидуальным сценариям, так как являются обычно наложением большого количества случайных факторов, таких как износ оборудования, ошибочные действия персонала, неправильная работа ПА, в частности, из-за отсутствия в алгоритме ПА реально возникающих сценариев развития аварии.

Широкую известность получили ряд крупных аварий в ЕЭС. Одной из первых в ЕЭС была авария в Московской энергосистеме в декабре 1948 года, когда без внешнего электроснабжения остались даже правительственные инфраструктурные организации [4]. В 1983 и 1985 гг. в Самараэнерго [5] происходило глубокое снижение напряжения с нарушением устойчивости и асинхронным режимом по линиям связи с энергосистемой вследствие перегрузки ЛЭП 110–220 кВ из-за аварийного отключения питающих автотрансформаторов со стороны транзитной сети 500 кВ. Такие процессы происходили в условиях недостаточной эффективности устройств автоматики разгрузки по снижению напряжения и отказов в работе устройств АЧР при низком напряжении в сети. 6 июня 1997 г. произош-

ло полное погашение Омской энергосистемы после ее отделения от ЕЭС с большим дефицитом мощности и глубоким снижением частоты вследствие неправильного действия автоматики отделения тепловых электростанций (ТЭС) [5].

Системная авария 9 сентября 2000 г. в ОЭС Урала (Свердловской, Челябинской и Курганской энергосистемах) привела к аварийному отключению реактора Белоярской АЭС, отключению блоков на Рефтинской ГРЭС, полному сбросу нагрузки и потере собственных нужд Аргаяшской ТЭЦ, кратковременному перерыву внешнего электроснабжения стратегически важного объекта ПО «Маяк» и Северного узла Центральные электрические сети Челябинэнерго в целом, обесточению Восточного узла Свердловэнерго и Шадринского энергоузла. Причиной системной аварии являлось наложение целого ряда ошибок оперативного персонала энергообъектов, диспетчеров различных уровней системной иерархии, отказов электросетевого и коммутационного оборудования, РЗ и ПА.

И, конечно, самым показательным случаем системной аварии следует считать аварию в Мосэнерго, произошедшую 25 мая 2005 г. с погашением 1/3 части потребителей г. Москвы и Московской области и части прилегающих энергосистем Тульской и Калужской областей. Эта авария выявила, с одной стороны, недостаточное инвестирование в региональное сетевое развитие: строительство и ввод новых высоковольтных линий (ВЛ) и подстанций (ПС) 35–500 кВ, замену перегруженных фазных проводов ВЛ и замену трансформаторов и автотрансформаторов (АТ) ПС 35–500 кВ, а с другой, недостаточное внимание к разработке, внедрению и развитию новых эффективных алгоритмов централизованной и региональных ЦАРЧМ, САРЧМ, АЧР, АРЛ, АСН и другой ПА с заменой морально и физически устаревшего оборудования систем АРЧМ, РЗА и ПА в целом.

Все эти и ряд других аварий свидетельствуют о недостаточной общесистемной и региональной надежности ЕЭС РФ, а также внешнего электроснабжения крупных ответственных потребителей электроэнергии, к которым сегодня можно отнести и многие областные центры с электрической нагрузкой 500 МВт и более. Совсем недавно, 12 сентября 2005 г. в Магнитогорском промышленном узле произошла авария на ПС Магнитогорская-500, связанная с ошибкой оперативного персонала, в результате которой после короткого замыкания на шинах 220 кВ было потеряно 600 МВт генерации блок-станций ОАО «ММК», вследствие чего промышленное производство остановилось более чем на 4 часа. Данная ситуация является еще одним наглядным примером, когда район с практически сбалансированной нагрузкой погасился из-за того, что мероприятиям по выделению энергорайонов не уделяется достаточного внимания, не смотря на то, что именно такой путь

ликвидации аварии в ЭС видится наиболее перспективным.

По системообразующей сети 500–750 кВ ЕНЭС РФ обычно идут перетоки мощности, покрывающие небалансы генерации и потребления электрической мощности в различных частях отдельных ОЭС и ЕЭС в целом. Поэтому аварийное отключение на крупных электростанциях мощных энергоблоков или отключение одной или нескольких нагруженных магистральных ЛЭП 500–750 кВ может привести к развитию местной аварии, связанной с нарушением установившегося баланса мощности, превращая ее в системную аварию. При этом возникает внезапный скачкообразный дефицит (избыток) мощности на валах турбогенераторов местных электростанций и появляются технологические трудности в быстром балансировании потребления и генерации. Такое развитие аварии может быть не только при отключении нагруженной магистральной связи энергорайона с ЭС, но и при наличии связи энергорайона с ЭС по слабым сечениям с протекающим по ним асинхронным ходом, сопровождающимся в колебательном режиме увеличением и уменьшением частоты, напряжения и тока в точках, находящихся по разным концам указанных связей. При больших качаниях в системе, изменениях уровней напряжения, тока и частоты, работа местной ПА с учетом инерционности регуляторов приведет к неадекватным управляющим воздействиям на оборудование электростанций и окажет негативное влияние на сохранение устойчивости [6]. Естественно, что при обучении оперативного персонала невозможно предусмотреть все возможные сценарии развития аварии. Даже аналитический и технологический разбор таких аварий зачастую происходит в дискуссионной форме и не имеет однозначных ответов. Поэтому в таких ситуациях нельзя требовать от оперативного персонала принятия быстрых (соизмеримых с временем работы ПА) аналитических и технологических решений, а тем более их реализации.

Практические системные аварии возникают в ремонтных схемах системообразующей сети с перегрузкой шунтирующих ВЛ 110–220 кВ, сопровождаются снижением напряжения и частоты в энергосистеме, посадкой некоторых станций на «нуль» и длительным отключением электро- и теплоснабжения потребителей и затянувшейся последующей подачей напряжения на погашенные станции с завершающим сбором нормальных схем.

Авторам видится необходимость повышения надежности электроснабжения потребителей путем дополнения балансирующего принципа ПА координацией управления генерацией, потреблением, перетоками между ЭС и ОЭС в различных частях ЕЭС России, а также внедрением современных информационных технологий в ПА. Применение принципа координации автоматического управле-

ния возможно путем разграничения «сфер воздействия» системной ПА и местной системы ПА. Местная ПА должна работать по принципу отделения собственной генерации на сбалансированную нагрузку местных потребителей, не дожидаясь достижения заведомо губительных как для теплосилового и электросилового энергооборудования электростанций, так и для электроустановок потребителей [6] значений параметров режима системы. Такой принцип подразумевает работу системной ПА при необходимости балансирования в ЕЭС, и работу местной ПА при возникновении системной аварии и отделении ЭС или ее отдельных энергоузлов от ОЭС ЕЭС по достижению некоторых «стратегических» режимно-диспетчерских факторов. Такими факторами можно считать предаварийное изменение нормального положения коммутационных аппаратов основного электросетевого оборудования системообразующей сети 110–750 кВ в сочетании с предаварийными величинами перетоков по межсистемным связям и АТ связи с системообразующей сетью ЭС, а также значение частоты в ОЭС, уровни напряжения на «пограничных» ПС.

Выделение энергорайона на автономную работу в аварийной ситуации, предполагает автоматическое с помощью САОН, АРЛ, АСН или «головной АЧР» (с применением специальных реле-частотомеров) отключение энергорайона от энергосистемы по некоторым узловым ПС с последующим доведением в них баланса активной и реактивной мощности по генерации и потреблению. Такое балансирование возможно произвести за счет отключения части турбогенераторов или части нагрузки, например, с шин электростанции, – «грубая» балансировка. Завершение доведения баланса за счет действия САРЧМ на электростанциях выделившегося энергорайона, обеспечивающей первичное общее и нормированное регулирование частоты и активной мощности на станциях, а также действие первоочередной АЧР с определенными (расчетным путем) и обоснованными (в темпе процесса) технологически необходимыми объемами и уставками по частоте и времени – «точная» балансировка. Доведение баланса по реактивной мощности в выделившемся энергорайоне при отключении части турбогенераторов обеспечивается за счет автоматического (по уровням напряжений) включения дополнительных резервных нерегулируемых источников реактивной мощности – «грубая» балансировка, и работой АРВ оставшихся в работе турбогенераторов, а также работой регулируемых статических тиристорных компенсаторов, размещаемых на электростанциях или на узловых сетевых ПС энергорайона, – «точная» балансировка.

Для реализации и внедрения эффективной схемы динамичного выделения отдельного энергорайона с достаточной располагаемой мощностью при возникновении системной аварии в ОЭС возможен следующий алгоритм действий ПА:

- выявление схемно-режимных критериев возникновения системной аварии;
- оценка баланса генерации и потребления активных и реактивных мощностей в энергорайоне, подготавливаемом к выделению;
- отделение энергорайона от системы с первоначальным грубым балансированием по активной и реактивной мощности;
- точное балансирование генерации и потребления активных и реактивных мощностей в выделившемся районе, доведение параметров режима до нормальных;
- подготовка к синхронизации с системой.

Рассмотрим вариант реализации предлагаемых решений на базе наиболее тяжелой аварии для Челябинского энергоузла, инициированной аварией в ОЭС Урала. Челябинский энергоузел типичен для крупных промышленных городов в части наличия у ГПП 110–220 кВ энергоемких промпредприятий мощных электрических связей с ПС 220 и 500 кВ Челябинских магистральных электрических сетей (ЧМЭС), а у городских электросетей (ЧГЭС) – хороших связей с ПС 110 кВ ЧМЭС и с Челябинскими электростанциями. Отличительной особенностью является то, что генерирующих мощностей Челябинских электростанций достаточно только для покрытия нагрузки ЧГЭС и небольшой части неэнергоемких промышленных потребителей.

При авариях во внешней сети 220–500 кВ ЧМЭС, связанной с сетью ЕНЭС ОЭС Урала, возложение задачи балансирования нагрузки и сохранения устойчивости на Челябинские электростанции может привести к развитию аварии с их погашением. Аналогичное развитие событий уже наблюдалось при системной аварии в ОЭС Урала – Свердловской и Челябинской энергосистемах.

Проблема усугубляется тем, что единичная мощность синхронных генераторов Челябинских ТЭЦ не превышает 200 МВт, а основной парк генерирующих мощностей составляют машины мощностью 25–100 МВт. Не смотря на то, что они в большинстве случаев оснащены АРВ СД, наиболее мощные из них имеют тиристорную систему самовозбуждения, что при снижении напряжения во время развития аварии вызывает лавину напряжения на выводах генераторов [7] и приводит к их остановке. Учитывая изложенное, для сохранения электро- и теплоснабжения городской нагрузки и части нагрузки неэнергоемких промпредприятий г. Челябинска при системных авариях в ОЭС Урала предлагается следующая схема динамичного и статичного (ручного по командам диспетчера ЧРДУ) выделения Челябинского энергоузла с городской нагрузкой на автономную работу.

Для успешного оперативного динамичного выделения Челябинского энергоузла из состава ЭС Челябинской области при аварии в ОЭС Урала необходимо произвести отключения ВЛ 110 кВ, связывающих Челябинский городской энергоузел

с ЕНЭС 220–500 кВ в заранее намеченных точках (сечениях):

– ОРУ 110 кВ ПС ЧМЭС с ОРУ 110 кВ Челябинских электростанций;

– ОРУ 110 кВ ПС энергоемких промпотребителей с ОРУ 110 кВ Челябинских электростанций;

– ОРУ 110 кВ ПС ЧМЭС и ОРУ 110 кВ ПС ЧГЭС;

– ОРУ 110 кВ ПС энергоемких промпотребителей и ОРУ 110 кВ ПС ЧГЭС.

В выделенном энергоузле произойдет изменение потокораспределения активных и реактивных мощностей вследствие изменения состава источников питающей сети 110 кВ и самой конфигурации электрической сети 110 кВ. Питающими источниками остаются только Челябинские ТЭЦ. На основании проведенных расчетов установившихся режимов для различного состава оборудования Челябинских ТЭЦ определены слабые сечения, в которых необходимо произвести замену фазных проводов некоторых ВЛ 110 кВ. Поэтому для внедрения технологической схемы отделения Челябинского городского энергоузла предварительно следует провести реконструкцию и усиление существующей сети.

В случае неудачного динамичного выделения Челябинского энергоузла на автономную работу при аварии в ОЭС Урала и посадке на «нуль» Челябинских электростанций, чтобы не допустить полного погашения электроснабжения г. Челябинска, для статичного выделения энергоузла необходимо оснастить системами гарантированного электроснабжения схемы собственных нужд электростанций, газораспределительных пунктов (ГРП) и станций (ГРС), например, установив на них дизель-генераторы необходимой мощности. Если же ГРП и ГРС будут погашены, то разворот станций должен осуществиться на резервном запасе топлива.

Наряду с отключением ряда ВЛ в энергоузле для обеспечения транзита мощности от электростанций к потребителям без захода на СШ 110 кВ ПС ЧМЭС на двух таких ПС (Шагол 500/220/110 и Исаково 220/110) необходимо провести частичную реконструкцию схем ОРУ 110 кВ. Установка двух новых дополнительных выключателей 110 кВ на каждой ПС обеспечит «спрямление» линий связи между электростанциями и ПС 110 кВ ЧГЭС и потребительскими ПС 110 кВ Челябинского городского энергоузла и их надежное двухстороннее питание.

В качестве управляющих воздействий на приведение схемы к исполнению предлагается использовать сигналы, которые можно получить за счет активизации существующей системы САОН Челябинского узла. Активизация САОН достигается изменением в ее логическом устройстве режимных критериев запуска ВЧ-передатчиков и посылки соответствующих команд ВЧ-приемникам, установленным на тех энерго-

объектах, на которых имеются отмеченные точки деления и дополнительные выключатели. После детального технологического анализа логики схемно-режимных вариантов работы САОН для динамичного выделения Челябинского узла на автономную работу предлагается сформировать особый сигнал и разослать команды на указанные энергообъекты по отключению конкретных ВЛ и включению дополнительных выключателей при одновременной реализации событий, которые характеризуют режим в энергосистеме как предаварийный по достижении ряда схемно-режимных критериев: положению коммутационных аппаратов АТГ связи с системой, величине их загрузки, значению частоты в энергосистеме.

Динамичное доведение баланса генерации и потребления в выделившемся Челябинском энергоузле производится организационно-техническими мероприятиями, работающими по следующему технологическому алгоритму.

Грубое первоначальное балансирование режима обеспечивается применением мобильного (от сигналов САОН или специальной АЧР) автоматического отключения связей с энергоемкими промпотребителями, остающимися на электроснабжении от ПС ЧМЭС. При этом на всех электростанциях Челябинского энергоузла на серверах оперативно-информационного комплекса «Диспетчер» в темпе процесса отображается и контролируется величина небаланса между генерацией и потреблением в узле.

Доведение баланса мощности при избыточной генерации производится автоматическим сбросом мощности энергоблоков, состав которых зависит от величины избытка. В случае дефицита мощности в энергоузле и соответствующего снижения частоты до 47.3 Гц без выдержки времени произойдет автоматическое отключение нагрузки по вводам силовых трансформаторов ГПП неэнергоемких промпотребителей.

Такой алгоритм в большей части опирается на технические средства, уже имеющиеся в сетях и на электростанциях Челябинского энергоузла, а также на организационные мероприятия. Между тем, его полная реализация невозможна без реконструкции сети (усиление ряда ВЛ, развитие схем ОРУ 110 кВ некоторых ПС, установка дополнительных средств ТИ и ТС, установка реле-частотомеров и др.). Это затратная часть предложения. Но она неоднократно окупится при возникновении системных аварий в ОЭС Урала. Следует заметить, что многие из предложенных решений уже давно назрели и их техническая реализация будет способствовать развитию электрического хозяйства г. Челябинска, упрощению процедуры подключения новых мощностей потребителей, более гибкому ведению режимов энергосистемы и будет использоваться для надежного оперативно-диспетчерского управления в Челябинском городском энергоузле.

Выводы

Таким образом, анализ развития возникающих аварий в ЕЭС показал, что проблема сохранения устойчивости местных электростанций, обеспечивающих практически без дефицита приходящий сетевой потребительский узел, при больших возмущениях в ЭС чрезвычайно актуальна. Величина убытков от недоотпуска электроэнергии при системных авариях исчисляется десятками и сотнями миллионов рублей. Одним из путей локализации развивающейся системной аварии является предупреждающее выделение ограниченного энергоузла с местными электростанциями на автономную от ЭС работу с контролем баланса активных и реактивных мощностей как в предаварийном режиме, так и во время развития аварии и после отделения от внешней электрической сети [6]. На примере типичного для промышленных энергорайонов Челябинского энергоузла показано, что организационно-технические и технологические мероприятия по координации баланса мощностей позволяют избежать достижения режимными параметрами в энергоузле губительных значений для электроэнергетического оборудования местных ТЭЦ и потребительских электроустановок и обеспечить в выделившемся энергорайоне устойчивую работу электростанций на сбалансированную нагрузку города.

Литература

- 1 Коцеев, Л.А. Системная противоаварийная автоматика в ЕЭС СССР (России) / Л.А. Коцеев // *Электрические станции*. – 2005. – №1.
- 2 Зейлидзон, Е.Д. Противоаварийная автоматика Единой энергетической системы СССР / Е.Д. Зейлидзон, М.Г. Портной, С.А. Савалов // *Электрические станции*. – 1972. – №3.
- 3 Веников, В.А. Электрические системы: управление переходными режимами электроэнергетических систем / В.А. Веников. – М.: Высшая школа. – 1982.
- 4 Ишкин, В.Х. Централизованная система управления – гарантия эффективности и безаварийности электроэнергетического комплекса страны / В.Х. Ишкин // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. – 2001. – №5.
- 5 Кучеров, Ю.Н. Современное состояние автоматической частотной разгрузки энергосистем и пути ее совершенствования / Ю.Н. Кучеров, А.А. Окин // *Электрические станции*. – 2001. – №12.
- 6 Белослудцев, К.А. Возможные пути развития аварий, вызванных большим дефицитом мощности / К.А. Белослудцев, Ю.Е. Гуревич // *Электрические станции*. – 2004. – №9.
- 7 Гольдштейн, М.Е. Минимальная кратность форсировки синхронных генераторов с системами самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, Е.И. Пахомов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2004. – №4.

Шумаков Игорь Юрьевич, ведущий специалист отдела АСДУ ЧРДУ. В 2003 г. окончил ЮУрГУ по специальности «Электрические системы».

Гольдштейн Михаил Ефимович, зав. кафедрой «Электрические станции, сети и системы», кандидат технических наук, профессор. Выпускник кафедры ЭССиС 1961 г.

Серов Николай Петрович, начальник отдела АСДУ ЧРДУ. Выпускник кафедры ЭССиС 1973 г.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

УДК 62-83:681.51

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КУРСА ТОЭ

Д.В. Савинова
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматривается применение имитационного моделирования для повышения качества обучения при изучении линейных цепей в курсе ТОЭ. Приведены примеры разработанных моделей и представлены результаты моделирования. Описана методика проведения занятий и оценена их эффективность.

Повышение качества образования возможно в первую очередь на основе применения новых информационных технологий. При изучении электротехнических дисциплин особенно перспективно применение имитационного моделирования. Наиболее широкими возможностями в построении имитационных моделей обладает математический пакет Matlab с приложением Simulink [1, 2].

При имитационном моделировании модель как бы заменяет исследователю реальный объект, но обладает дополнительным важнейшим свойством – в ней доступны для изменения и измерения все входящие в нее параметры и переменные, доступ к которым в реальном объекте по разным причинам может быть невозможен.

Применение имитационного моделирования целесообразно начинать с младших курсов. Особенно целесообразно использование имитационных моделей в курсе ТОЭ при изучении переходных процессов и несинусоидальных токов.

Разработаны модели для изучения переходных процессов в различных линейных цепях. Адекватность некоторых моделей проверяется студентами при выполнении лабораторных работ.

Фронтальное проведение лабораторных работ на виртуальных моделях и синхронное их выполнение студентами обеспечивает возможность обмена мнениями и совместного анализа результатов.

Применение имитационного моделирования в курсе ТОЭ, а также дальнейшее его применение в специальных курсах способствует повышению качества обучения студентов по специальности «Электроснабжение». Применение виртуального моделирования позволяет облегчить обучение студентов-заочников, особенно с учетом малого числа лабораторных работ, предусмотренных учебным планом.

Ниже приведены примеры некоторых виртуальных моделей, используемых как для проверки и углубленного анализа при выполнении домашних заданий, так и при подготовке к лабораторным работам.

На рис. 1 приведена схема модели, позволяющей исследовать переходные процессы при включении и выключении последовательного колебательного контура на постоянное и переменное синусоидальное напряжение. Модель содержит источники постоянного и переменного синусои-

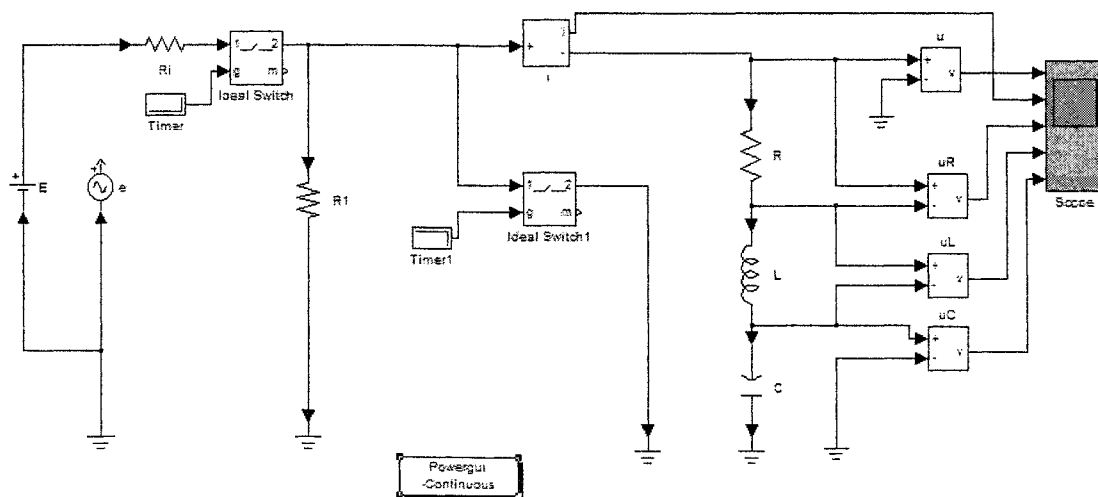


Рис. 1. Модель для исследования переходного процесса включения последовательного колебательного контура

дального напряжения (E, e) с внутренним сопротивлением R_i , идеальные ключи (Ideal Switch, Ideal Switch 1) и нагрузку, содержащую элементы R, L, C . Датчики тока и напряжения на нагрузке и ее элементах (i, u, u_R, u_L, u_C) преобразуют ток и напряжения в информационные сигналы, подаваемые на осциллограф (Scope). Таймеры (Timer, Timer 1) задают моменты переключения ключей. Модель позволяет просто изменять источник питания, менять все параметры и исключать некоторые элементы схемы. В модели предусмотрена возможность изменения моментов коммутации. Резистор R_I позволяет решать уравнения при некорректных начальных условиях. Его сопротивление очень велико и не влияет на характер процессов.

В модели имеется возможность наблюдения переходного процесса и установившегося режима.

На рис. 2 приведены осциллограммы процессов в схеме при включении постоянного (а) и переменного (б) напряжения.

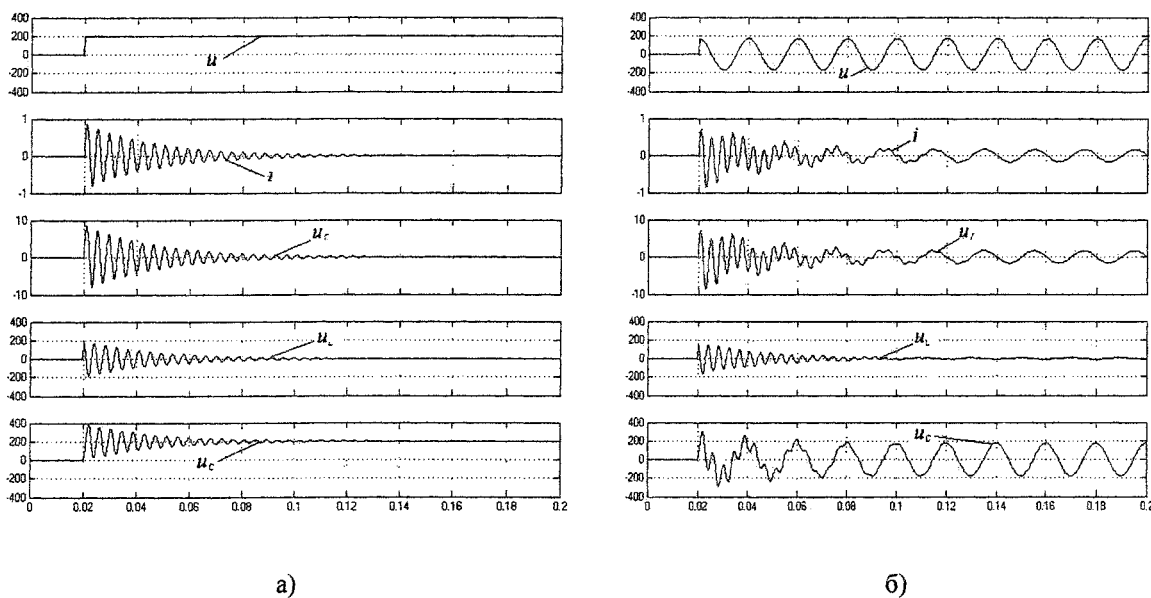


Рис. 2. Осциллограммы процессов при включении постоянного (а) и переменного (б) напряжения

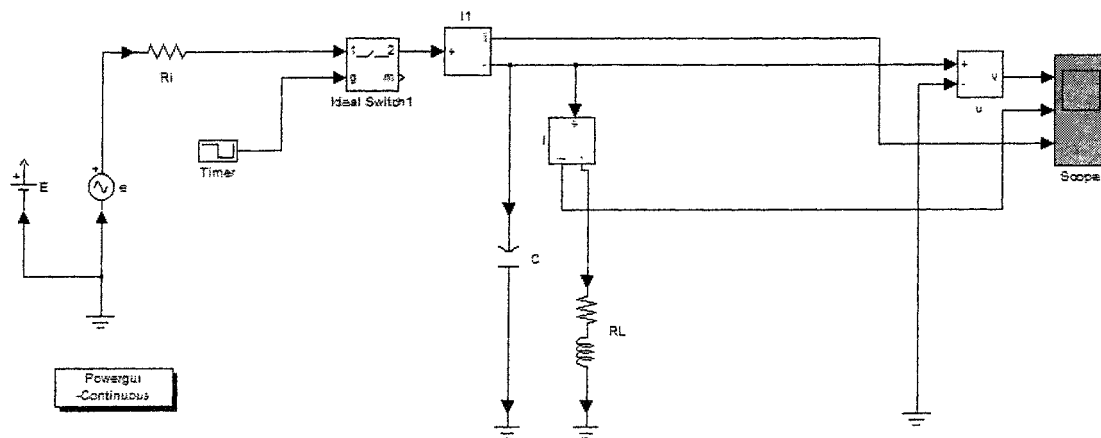


Рис. 3. Модель для исследования переходных процессов при включении и выключении параллельного колебательного контура

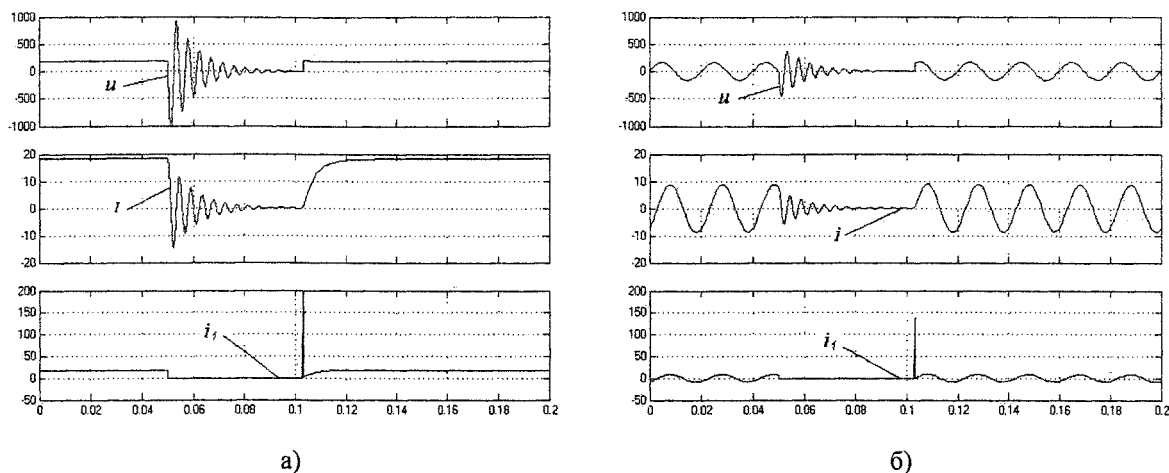


Рис. 4. Осциллограммы процессов при выключении и включении постоянного (а) и переменного (б) напряжения

сов в схеме при включении постоянного (а) и переменного (б) напряжения.

Изменение моментов коммутации при включении переменного напряжения позволяет наглядно убедиться в их влиянии. Расчетными способами это сделать затруднительно.

Сравнение результатов моделирования и расчетных работ, выполненных аналитическими методами, позволяет студентам убедиться в правильности решений. Имитационное моделирование способствует более глубокому изучению процессов в связи с широкими возможностями варьирования

параметров и режимов. Имитационное моделирование может применяться при выполнении предварительных расчетов к лабораторным работам.

Литература

1. Герман-Галкин, С.Г. *Линейные электрические цепи* / С.Г.Герман-Галкин: *Лабораторные работы на ПК.* – СПб.: КОРОНА принт., 2002. – 192 с.
2. Черных И.В. *SIMULINK: среда создания инженерных приложений* / И.В. Черных. – М.: ДИАЛОГ МИФИ, 2003. 496 с.

Савинова Дина Владимировна – доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ, кандидат технических наук. Окончила УПИ в 1956 г. Научные интересы – теоретическая электротехника и ее приложения.

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 12 (84) 2007

**Серия
«ЭНЕРГЕТИКА»
Выпуск 7**

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 21.05.2007. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 500 экз. Заказ 136/38.

Отпечатано в типографии издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.