

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ИМПУЛЬСНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

В. П. ОБРУСНИК

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Магнитные усилители, дроссели насыщения и подмагничиваемые трансформаторы являются широко известными ферромагнитными регуляторами напряжения и тока. Простота устройства и изготовления, дешевизна и высокая эксплуатационная надежность обеспечили им в свое время быстрое внедрение в технические устройства самого различного назначения. За короткий промежуток времени создана теория процессов ферромагнитных регуляторов (ФМР), разработаны методы их проектирования, организован серийный выпуск как самих регуляторов, так и систем на их основе.

Однако появление тиристорных и транзисторных ключей, обладающих одинаковыми с магнитными ключами регулировочными свойствами при намного большем быстродействии и меньших весо-габаритных показателях, резко сузило практическое применение ФМР в области силовой техники. Многие специалисты считают эти регуляторы неперспективными и не конкурентноспособными с вентильными устройствами.

Не разделяя крайних суждений о ФМР, следует все же признать, что значительная часть нареканий в их адрес справедлива, если иметь в виду ферромагнитные регуляторы с непрерывным управлением.

В сравнительной оценке с вентильными регуляторами больше всего проигрывают магнитные усилители с самонасыщением, признанные в свое время лучшими среди ФМР других типов. Они не имеют здесь никаких дополнительных преимуществ, обладая большим весом и инерционностью. Неконкурентно-способность ФМР с самонасыщением по отношению к вентильным регуляторам очевидна даже при высокой частоте питающего напряжения, когда вес, габариты и инерционность тех и других становятся соизмеримыми. ФМР с самонасыщением имеют в силовой цепи неуправляемые вентили и достаточно последние сделать управляемыми, что не ухудшит весо-габаритные показатели системы, сохранит ей те же регулировочные свойства и не потребует существенного усложнения схемы управления, как станет очевидной ненужность ферромагнитной части. Вывод здесь напрашивается один — ФМР, работающие в режиме самонасыщения всегда хуже по удельно-экономическим показателям, чем вентильные регуляторы (тиристорные или транзисторные) [9].

Однако сделанное заключение будет неверным для ФМР, не имеющих положительных обратных связей (внутренних и внешних) по току нагрузки. Эти регуляторы на (30—40) % тяжелее ФМР с самонасыщением и обладают малым коэффициентом усиления по мощности (не

более 100), но будучи прекрасными регуляторами тока, они получают преимущества, несвойственные вентильным устройствам. Центральными из этих преимуществ являются: самозащита от перегрузок и токов короткого замыкания, естественная стабилизация тока нагрузки, отсутствие вентилей в силовой цепи при нагрузках переменного тока.

Перечисленные свойства для ряда электрических систем являются решающими (особенно в энергетических установках очень большой мощности), поэтому ферромагнитные регуляторы дроссельного типа применяются и будут применяться во многих электротехнических установках, несмотря на свои проигрышные показатели по инерционности, весу, габаритам и чувствительности к управляющему сигналу. При существенном улучшении этих показателей возможности практического применения ФМР еще более расширятся, чего можно достичь и даже обеспечить ферромагнитным регуляторам принципиально новые свойства, если управление их магнитными элементами осуществлять дискретно.

При дискретном управлении ФМР управляющее воздействие, приводящее к изменению магнитного состояния сердечников и соответственно к регулированию электрических параметров выходной цепи, должно быть не непрерывным, а импульсным, дозированным в определенные промежутки времени.

Все известные способы импульсного управления магнитными элементами основаны на том, что те или иные цепи этих элементов «закрываются-размыкаются» с какой-то частотой и скважностью коммутации. Разработаны и исследуются дискретно-управляемые ФМР, у которых осуществляется:

- а) коммутация цепи подмагничивания от источника напряжения постоянного тока [12];
- б) коммутация цепей токовых обратных связей (чаще всего по току гармоник) [5];
- в) одновременная коммутация цепей источника подмагничивания и обратных связей;
- г) коммутация обмоток переменного тока [4, 6, 13, 21].

Ферромагнитные устройства, управляемые по пункту «а», являются регуляторами тока, имеющими в разомкнутых системах внешние характеристики, аналогичные кривым на рис. 3а. Устройства, управляемые по пунктам «б» или «в», являются регуляторами напряжения с внешними характеристиками, обладающими токоограничением (рис. 3б), а создание постоянной составляющей индукции чистокоммутационным способом по пункту «г» дает регуляторы напряжения с внешними характеристиками без токоограничения на рис. 3в.

Естественно, что в замкнутых системах автоматического регулирования все группы дискретно-управляемых ферромагнитных устройств могут выполнять любые функции, в том числе функции регуляторов-стабилизаторов напряжения, тока или мощности. При классификации удобно их свойства устанавливать для разомкнутых систем и подразделять на два класса:

- а) импульсно-подмагничиваемые ферромагнитные регуляторы — ИП ФМР, у которых регулирование выходных величин осуществляется за счет коммутации цепей подмагничивания постоянным током;
- б) импульсно-коммутируемые ферромагнитные регуляторы — ИК ФМР, у которых выходные величины регулируются только за счет коммутации обмоток переменного тока.

Каждый из двух классов импульсно-управляемых ФМР обладает разными свойствами, дает разные регулировочные и внешние характеристики, а поэтому имеет самостоятельное назначение. Для импульсно-управления магнитными элементами требуется высокое быстродействие.

вие. Лучше, когда процессы коммутации происходят безынерционно, поэтому эффективная реализация этих способов стала возможной с появлением полупроводниковых ключей (транзисторных и тиристорных).

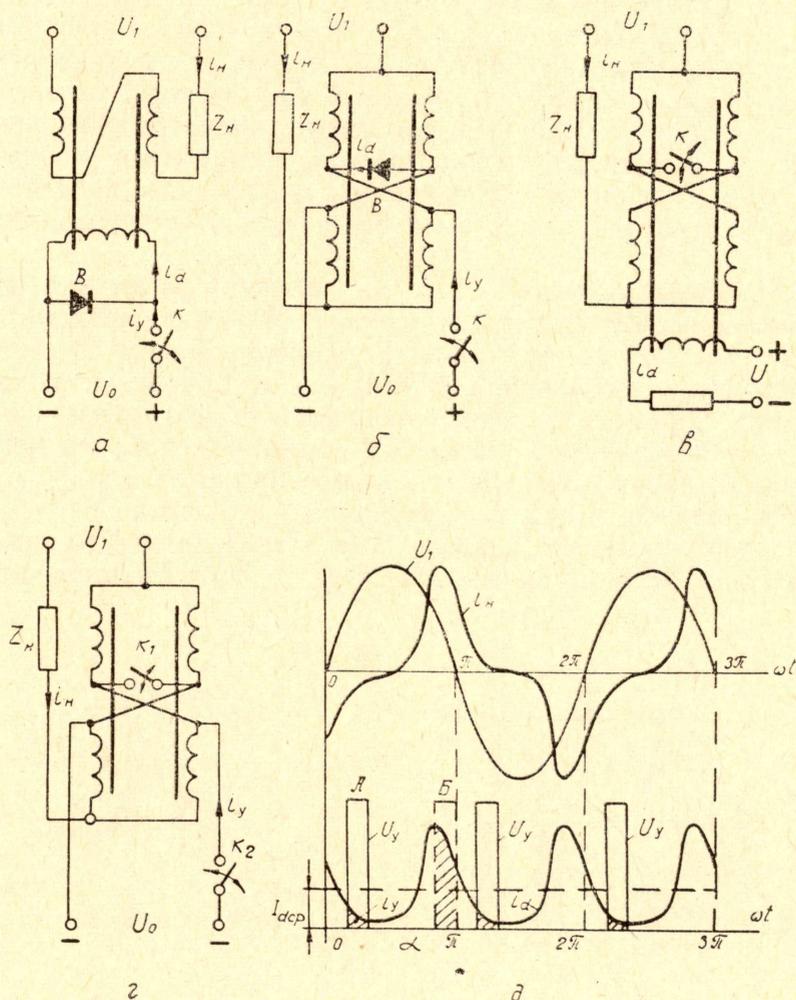


Рис. 1.

На рис. 1, а, б, в, г показаны типовые варианты принципиального использования ИП ФМР. Картина изменения во времени основных величин этих регуляторов в установившихся режимах при активно-индуктивной нагрузке иллюстрируется (рис. 1, д). Схемы построены на простейших магнитных элементах — дросселе насыщения (ДН), рис. 1, а, и лучшем варианте его исполнения — дросселе насыщения с совмещением обмоток переменного и постоянного тока (ДНС), рис. 1, б, в, г. Подключение здесь согласующих трансформаторов (автотрансформаторов) или их конструктивное объединение с дроссельными элементами, что дает устройства типа ТРПШ, АТРПШ, ТРПН и т. д. [1], а также трехфазное исполнение схем ИП ФМР не скажется на существовании излагаемых ниже рассуждений.

В схемах на рис. 1, а, б импульсное управление ФМР осуществляется за счет коммутации цепи источника напряжения постоянного тока. Здесь характерно наличие вентиля B , шунтирующего цепь подмагничивания, и наличие быстродействующего ключа K (транзисторного или тиристорного), включенного последовательно с источником нерегулируемого напряжения постоянного тока U_0 . Вентиль B выполняет две функции: защищает ключ K от перенапряжений при «размыкании» и осу-

существляет положительную обратную связь по току гармоник. Впервые импульсное подмагничивание ФМР опробовано на усилителях с самонасыщением при использовании силовых полупроводниковых ШИМов [2, 20]. Здесь достигался единственный эффект — полупроводниковому регулятору, управляющему током i_y , обеспечивался наивыгоднейший режим — ключевой. Однако применение ШИМов для управления ферромагнитными элементами без положительных обратных связей по току нагрузки приводило к явлениям противоречивым. Ключи работали в одной и той же системе или очень хорошо, обеспечивая нужные ФМР характеристики и большие коэффициенты усиления, или не давали никакого дополнительного эффекта по сравнению с непрерывным управлением.

Исследования показали [9, 14], что причиной всему являются токи гармоник цепей подмагничивания, амплитуда и фаза которых существенно зависит от многих факторов. Если неправильно сориентировать импульс выходного напряжения ШИМа по отношению к мгновенному значению тока переменной составляющей цепи подмагничивания магнитного элемента (сравните на рис. 1 д позиции А и Б), то через ключ будет протекать очень большой ток i_y , что приведет к резкому уменьшению коэффициента усиления полупроводникового регулятора-ключа и к его тепловой перегрузке. Зависимости коэффициента усиления ФМР от тока нагрузки (в относительных единицах) и от фазы расположения

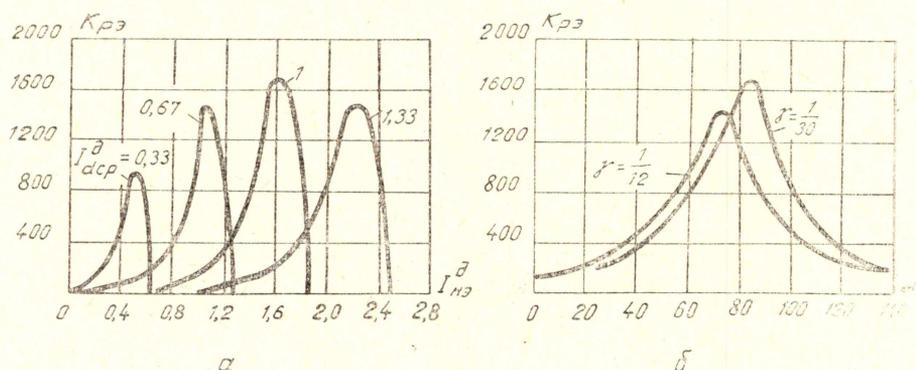


Рис. 2. Зависимость действующего значения коэффициента усиления ИП ФМР: а) от действующего тока нагрузки при постоянных установках амплитуды управляющего импульса напряжения (фаза и ширина импульса не меняется); величины $I_{дср}^д$ и $I_{на}^д$ выражены в долях от номинальных значений; б) от угла сдвига подмагничивающего импульса относительно начала полупериода сетевого напряжения.

управляющих импульсов по отношению к началам полупериодов питающего напряжения сети показаны соответственно на рис. 2, а и 2, б (здесь амплитуда и относительная длительность импульса γ приняты постоянными). Как видно, при одних и тех же параметрах управляющего импульса величина коэффициента усиления ФМР находится в сильной зависимости от фазы расположения импульса и от нагрузки, что объясняется влиянием указанных факторов на величину тока i_y , протекающего через ключ от источника U_0 (см. позиции А и Б на рис. 1, д).

С целью стабилизации коэффициента усиления ключа К предложен способ импульсного управления дроссельными магнитными элементами [12], при котором управляющий импульс напряжения подается в цепь подмагничивания при минимуме протекающего по ней тока (см. на рис. 1, д позицию А). Оптимальная частота следования управляющих импульсов кратна частоте основной гармоники тока подмагничи-

вания: для однофазных и групповых трехфазных ФМР — $f_u = 2f$ сети, для трехфазных — $f_u = 3f$ сети.

Установлено [14, 15], что если соблюдать указанные выше правила, то при среднем значении напряжения импульса, равном среднему значению управляющего напряжения непрерывного характера, все статические и динамические характеристики будут идентичны как для дискретного, так и для непрерывного принципов управления. При этом:

- дроссельные ФМР сохраняют свои характеристики регуляторов тока, обладающие естественными свойствами стабилизации тока нагрузки, защиты от перегрузок и коротких замыканий (см. на рис. 3, а внешние характеристики импульсно-подмагничиваемого ДНС на магнитопроводах из стали Э320, снятые опытно в относительных единицах);

- коэффициент усиления по мощности увеличивается в 20—25 раз и более;

- габаритная мощность ШИМа уменьшается в 10—20 раз;

- общий к. п. д. системы повышается на (2—3) %, что очень важно для мощных регуляторов напряжения и тока;

- импульсное подмагничивание по [12] позволяет создать на основе ФМР с совмещенными обмотками регуляторы напряжения и тока нового типа, которые по технико-экономическим показателям превосходят все известные ферромагнитные устройства, а в ряде случаев они оказываются лучше тиристорных и транзисторных регуляторов.

Последнее преимущество является центральным. Ферромагнитные устройства с совмещенными обмотками, будучи самыми простыми и экономичными по исполнению и не требующими дополнительных обмоток управления, не могли найти при непрерывном управлении широкого применения. Обладая низкими коэффициентами усиления, они еще требовали включения в цепь постоянного тока дроссельных фильтров или низковольтных и сильноточных источников напряжения, по весу и габаритам превосходящих сам регулятор. Импульсное подмагничивание по [12] снимает названные недостатки.

На основе импульсно-подмагничиваемых ферромагнитных устройств разработан ряд автоматических установок, успешно эксплуатируемых на практике. В их числе можно назвать: однофазные стабилизаторы напряжения переменного тока мощностью (200—1000) ВА [17]; источники питания для ванн электролитного нагрева мощностью 150 кВт [18] и 75 кВт [13], автоматизированные зарядные агрегаты [19] и др.

Проведен большой объем теоретических исследований режимов работы, характеристик и параметров импульсно-подмагничиваемых ФМР. Разработаны методики анализа и синтеза процессов и характеристик [14, 15], предложена методика проектирования систем ИП ФМР, оптимальных по технико-экономическим показателям [8, 9], разработаны для них простые схемы тиристорных и транзисторных ключей [7, 16]. Наиболее эффективно использовать ИП ФМР в качестве регуляторов напряжения и тока, мощностью 1—150 кВт.

Существенным недостатком импульсно-подмагничиваемых ФМР является большая инерционность для переходных процессов при возмущениях со стороны цепи управления. Их длительность такая же, как и у обычных дросселей насыщения. Можно избавиться от этого недостатка, если вентиль обратной связи ФМР по току гармоник сделать управляемым. Варианты такого дискретного управления обратной связью показаны на рис. 1 в, г.

Схема на рис. 1 в обладает при $i_d = \text{const}$ быстродействием в один полупериод, но требует дополнительной обмотки управления, а главное — содержит линейный дроссель в цепи управления, габариты и вес которого относительно велики.

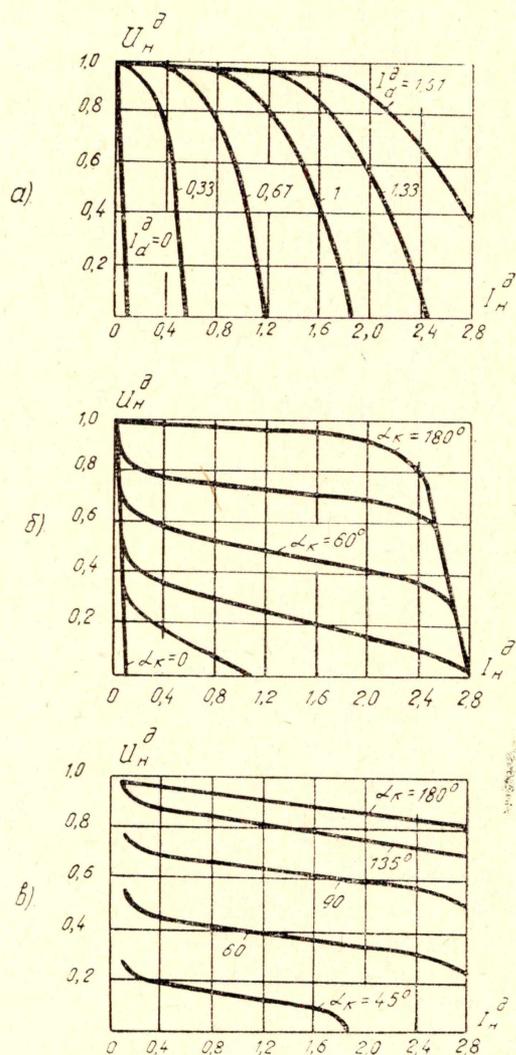


Рис. 3. Внешние характеристики импульсно-управляемых ФМР, выполненных на шихтованных магнитопроводах из стали Э-320, 0,35 мм: а) для ИП ФМР на рис. 1а, б) для ИП ФМР на рис. 1в, в) для ИК ФМР на рис. 4б. Везде $U_n^a = U_n : U_{ном}$, $I_n^a = I_n : I_{ном}$.

Лучшим вариантом является схема двухключевого импульсного управления ФМР на рис. 1, г. Здесь ключ K_2 задает на входе ДНС постоянные по амплитуде и длительности импульсы подмагничивающего напряжения, обеспечивая системе свойства, обусловленные способом управления по [12]. Ключ K_1 выполняет функции регулятора в замкнутых САР, как это описано в [5]. Система на рис. 1, д имеет такие же по качеству внешние (рис. 3, б) и регулировочные характеристики, как и система на рис. 1 б, но является безынерционной и меньшей по весу и габаритам, что в ряде случаев оправдывает ее некоторое усложнение за счет ввода дополнительного блока управления ключом K_1 .

Разновидность импульсно-управляемых ферромагнитных регуляторов класса ИК ФМР базируется на магнитно-вентильных устройствах (МВУ), у которых обмотка переменного тока магнитного элемента (или часть ее) периодически, на некоторый промежуток времени, меньший полупериода, закорачивается (один раз за период напряжения сети) полупроводниковым ключом [7, 13, 21]. Типовое конструктивное и схемное исполнение простейшего МВУ показано на рис. 4, а, б. Существуют еще схемы МВУ с согласующими трансформаторами, которые иногда объединяются с дроссельным элементом в одну конструкцию, что дает устройства типа МПТШ [13]. Суть происходящих процессов от этого не меняется.

Возможны два основных варианта коммутации ключей МВУ — естественная и искусственная. У магнитно-вентильных устройств с есте-

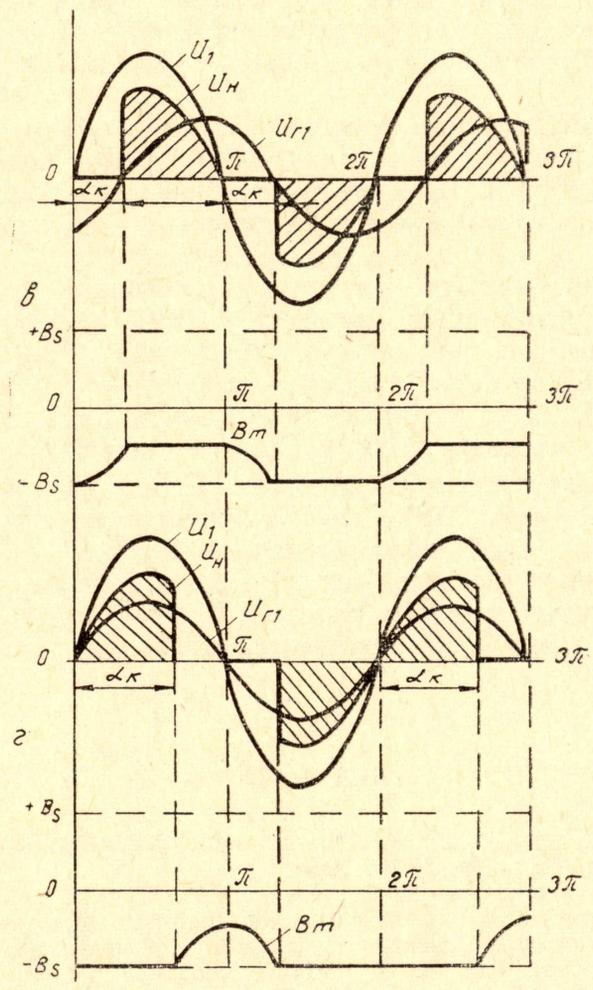
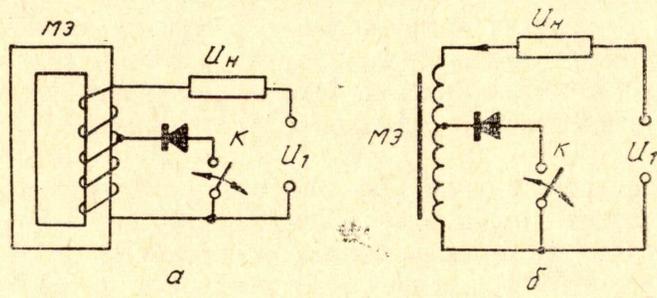


Рис. 4.

ственной коммутацией [6, 7, 21] ключевой элемент «закрывает» витки обмотки переменного тока в один из полупериодов с задержкой по углу α_K относительно начала периода напряжения сети и автоматически «размыкает» их при переходе тока нагрузки через ноль (рабочие диаграммы на рис. 4, б). Такой магнитно-вентильный регулятор по своим регулировочным свойствам и характеристикам мало чем отличается от полупроводникового симистора с естественной коммутацией. Фаза всех гармоник напряжения нагрузки здесь существенно изменяется при его регулировании (см. U_{r1} на рис. 4, в), что для ряда электроустановок считается недопустимым.

Более интересны МВУ с искусственной коммутацией [13]. Здесь ключ «закрывается» в начале каждого периода питающего напряжения на регулируемое время α_K , длительностью не более полупериода, после чего он принудительно «размыкается» и остается в этом состоянии до

начала очередного периода (диаграммы на рис. 4, *г*). Такие регуляторы обеспечивают в нагрузке напряжение, все гармоники которого не имеют фазового сдвига относительно напряжения сети (см. первую гармонику $U_{Г1}$ на рис. 4, *г*). Это весьма важно для многих нагрузок переменного тока и для построения стабилизаторов напряжения в многофазных системах.

Техническая реализация эффекта регулирования напряжения нагрузки без фазового сдвига получается на МВУ значительно проще, чем на симисторах или встречно-параллельно включенных вентилях. В известных вариантах МВУ оказываются не только проще, но в 1,5—2 раза легче и меньше по габаритам. Внешние характеристики ИК ФМР с искусственной коммутацией ключевого элемента показаны на рис. 3, *в*. Недостатком их является отсутствие токоограничения, что свойственно и для МВУ с естественной коммутацией, и для симисторных систем.

К настоящему времени проведен большой объем исследований режимов работы, параметров и характеристик МВУ, отработаны методики их расчета [10, 11]. По своим регулировочным свойствам они являются безынерционными регуляторами напряжения, обеспечивающими при искусственной коммутации ключей по [13] постоянный сдвиг основной (и любой другой) гармоники выходного напряжения. Интересно, что выходное напряжение МВУ с искусственной коммутацией содержит как нечетные, так и четные гармоники, удельный вес которых существенно зависит от угла коммутации ключевого элемента. Могут преобладать первые, вторые и третьи гармоники. Это позволяет на базе МВУ создавать безынерционные умножители частоты.

В числе конкретных электрических систем, выполненных на искусственно-коммутируемых МВУ, сейчас опробуются мощные однофазные и трехфазные стабилизаторы напряжения переменного тока [4].

Есть основания полагать, что при импульсных способах управления ферромагнитным устройствам класса ИП ФМР и ИК ФМР создаются перспективные возможности высокоэффективного практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием. М., «Энергия», 1965.
2. М. А. Боровиков, А. П. Инешин, В. А. Севастьянов. Анализ работы магнитного усилителя с самонасыщением, управляемого от широтно-импульсного модулятора. Известия вузов, «Электромеханика», 1969, № 3.
3. Э. Г. Завацкий, В. П. Обрусник, М. А. Житков. Стабилизированный трехфазный источник напряжения для питания ванн электролитного нагрева. Известия ТПИ, т. 243, 1972.
4. А. И. Зайцев, В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Дискретно-управляемые магнитно-вентильные устройства для регуляторов-стабилизаторов напряжения и тока. Сб. «Повышение эффективности устройств преобразовательной техники». Ч. 3, Киев, «Наукова Думка», 1972.
5. Е. Г. Захарова, Н. В. Захаров. Бесконтактный быстродействующий регулятор переменного тока. Сб. «Электрический разряд в электротехнологических установках». Чебоксары, изд-во госуниверситета, 1971.
6. Б. Н. Иванчук, Р. А. Липман, Б. Я. Рувинов. Тиристорные усилители в схемах электропривода. М., «Энергия», 1966.
7. Б. Н. Иванчук, Р. А. Липман, Б. Я. Рувинов. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. М., «Энергия», 1968.
8. А. В. Кобзев. Метод анализа процессов в цепях с магнитными усилителями и подмагничиваемыми трансформаторами. Сб. «Статические преобразователи в автоматике и электроприводе». Томск, изд-во ТГУ, 1971.
9. А. В. Кобзев. Разработка и исследование импульсно-подмагничиваемых ферромагнитных устройств. Канд. диссертация, ТПИ, Томск, 1972.
10. А. В. Кобзев, В. П. Обрусник. Теория процессов дискретно-уп-

руляемых ферромагнитных устройств, не подмагничиваемых постоянным током. Известия вузов, «Электромеханика», 1972, № 5.

11. А. В. Кобзев, В. П. Обрусник, М. Г. Савков. Дискретное управление ферромагнитными устройствами без подмагничивания постоянным током. Известия ТПИ, т. 243, 1972.

12. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Способ импульсного управления. Авт. свид. № 245842. Бюллетень изобр. № 20, 1969.

13. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Способ управления магнитно-полупроводниковым трансформатором с шунтом. Авт. свид. № 276171. Бюллетень изобр. № 23, 1970.

14. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Режимы работы и характеристики подмагничиваемых трансформаторов при импульсном подмагничивании. Доклады VI научн.-техн. конференции по вопросам автоматизации производства. Томск, изд-во ТГУ, 1969.

15. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Физические процессы в ферромагнитных подмагничиваемых устройствах при импульсном управлении. Известия ТПИ, т. 243, 1972.

16. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Промежуточные усилители для подмагничиваемых регуляторов. Доклады VI научн.-техн. конференции по вопросам автоматизации производства. Томск, изд-во ТГУ, 1972.

17. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев, Г. А. Хайдурова. Стабилизатор напряжения с расширенным диапазоном стабилизации. Информ. листок Томского ЦНТИ, № 31—72.

18. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев и др. Статический преобразователь напряжения мощностью 150 квт. Информ. листок Томского ЦНТИ, № 30—72.

19. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев, С. К. Земан. Автоматизированный зарядный агрегат АЗАТ-2 для зарядки автомобильных аккумуляторов. Известия ТПИ, Томск, т. 243, 1972. Информ. листок Томского ЦНТИ, № 11—72.

20. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин, А. И. Есин. Промежуточный полупроводниковый усилитель класса Д для системы регулируемых электропроводов с магнитными усилителями. Известия ТПИ, Томск, т. 153, 1965.

21. И. М. Столяров. Магнитные усилители с полупроводниковыми и магнитными ключами. М., «Энергия», 1965.