

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1967.3.10>

*B. САРВ*

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

В природе снабжение потребителей электромагнитной энергией происходит на различных, оптимальных для данных потребителей частотах. Правда, это достигнуто в результате длительного процесса эволюции путем приспособления природных объектов к фактически существующему спектру излучения. Тем не менее замена спектрального излучения монокроматическим сильно ограничила бы возможности развития в природе. Таким же ограничивающим фактором в техническом прогрессе являлось бы питание всех потребителей электроэнергии током с одинаковой, но не оптимальной частотой. Поэтому одной из важнейших проблем в электротехнике является разработка различных преобразователей частоты, в том числе и магнитных.

Хотя в настоящее время основное внимание уделяется относительно надежным и компактным полупроводниковым преобразователям, интерес к магнитным преобразователям вследствие их предельной надежности не только сохранился, но и растет. Объясняется это тем, что с повышением частоты питания и с использованием новых результатов исследований появляется возможность устранить или уменьшить ряд их недостатков. Кроме того, иногда требуется электрическое отделение нагрузки от питающей сети. В таком случае в состав полупроводникового преобразователя входит отделяющий трансформатор, вес которого уже соизмерим с весом простых магнитных преобразователей частоты. В магнитных же преобразователях электрическое разделение нагрузки от питающей сети часто происходит автоматически.

Датой зарождения магнитных преобразователей считается 1902 г., когда Эпштейн показал возможность удвоения частоты на основе подмагничиваемого трансформатора [1].

Интенсивное применение различных магнитных умножителей частоты в выходных каскадах радиостанций происходило до 20-х годов [2-4]. К этому времени уже выяснилась целесообразность использования магнитных материалов с прямоугольной кривой намагничивания, а также подмагничивания с постоянным током в утроителях [5]. Однако отсутствие необходимых магнитных материалов, а также успешное развитие электроники сильно затормозили как применение, так и исследование магнитных преобразователей частоты. В 40-х годах появление улучшенных магнитных материалов и повышенная потребность в надежных элементах автоматики возобновили интерес к магнитным статическим устройствам. Вслед за успешным внедрением магнитных усилителей с 50-х годов последовало [3-18] и новое развитие магнитных преобразователей частоты. К настоящему времени их возможности далеко не исчерпаны. Именно в последние годы предложен ряд новых перспективных схем, в которых используются принципы внутренней обратной связи [19], подмагничивания с промежуточной гармоникой [20-22] и многофазной модуляции [23]. Поэтому в ближайшие годы можно ожидать расширения как исследований, так и применения магнитных преобразователей частоты.

Энергетическими магнитными преобразователями частоты являются прежде всего умножители частоты в целое число раз и источники регулируемой выходной частоты на базе магнитных усилителей [23–25]. Но работы, проведенные в Горьковском политехническом институте [26], предсказывают энергетическое применение и для магнитных делителей частоты.

В статье сделана попытка на основе последних работ (в том числе работ, проводимых в Институте термофизики и электрофизики АН ЭССР) охарактеризовать нынешнее положение в области магнитных умножителей и источников регулируемой частоты на базе магнитных усилителей и, в частности, сформулировать некоторые неотложные задачи дальнейших исследований.

## 1. Магнитные умножители частоты

Количество конкретных схем магнитных умножителей велико. Только для удвоения частоты предложены десятки схемных и конструктивных вариантов, хотя почти во всех них основными элементами являются только два нелинейных дросселя или трансформатора на одну фазу. Как показано в [19], с увеличением количества необходимых нелинейных элементов, при возрастании коэффициента умножения, возможное количество конкретных схемных разновидностей быстро растет. Поэтому важно обобщить имеющиеся результаты вместе с формулированием основных принципов создания магнитных умножителей и определить теоретические пределы этих принципов. При проектировании, конечно, можно учитывать целесообразную степень реализации таких пределов. Ценной работой в этом направлении является [19], где: 1) обобщается, какая симметричная цепь имеет свойства умножения частоты и какие частоты появляются на выходе такой цепи, 2) формулируется принципиальная эквивалентность различных конкретных цепей, что позволяет перенести результаты исследования одной из них на многие другие.

В остальных опубликованных работах объектом исследования являются в основном конкретные схемы. Наиболее подробно освещены вопросы работы, расчета и применения удвоителей [2–9, 13, 18, 27–42] и утроителей [2–5, 10–12, 14–16, 40–54] частоты, а также основывающихся на них каскадных умножителей [3–5, 11, 19, 55–60]. Разработаны, описаны и применяются, но из-за сложности процессов преобразования не полностью исследованы одноступенчатые умножители, умножающие частоту в 4 и более (в основном до 9) раз [3–5, 8, 10, 11, 17, 20–22, 60–71].

До настоящего времени магнитные умножители частоты нашли применение в установках индукционного нагрева [2–5, 15, 30, 60, 62, 63], электросварки [3, 5, 6, 30, 47], регулирования напряжения [5, 15, 27, 28, 38], питания и управления электродвигателями [3, 5, 7, 9, 16, 27, 62, 63], люминесцентного освещения [3, 5, 9, 62, 63], для уравнивания загрузки трехфазной сети в случае однофазного потребителя [5, 6], для питания магнитных усилителей [5, 9, 65, 68], а также в различных автоматических устройствах [3, 5, 15, 38, 59, 63]. При этом мощность построенных умножителей достигает 1000 квт [54].

Основными недостатками существующих магнитных умножителей являются: повышенный вес по сравнению с трансформаторами, низкий коэффициент мощности, большой ток холостого хода, а для многих потребителей также ограниченность выходного тока при заданном токе подмагничивания. Первые два показателя быстро возрастают с увеличением коэффициента умножения [19, 55]. Это, конечно, и служит основной причиной относительно ограниченного применения магнитных умно-

жителей в условиях большой потребности в различных преобразователях частоты. Необходимо отметить, что до конца не выяснены и предельные возможности устранения или уменьшения описанных недостатков. Для этого необходима обобщающая теория магнитных умножителей. Трудностью создания такой теории объясняется, вероятно, и тот факт, что обширная литература по магнитным умножителям состоит главным образом из статей, патентов и авторских свидетельств. Нам известны только четыре книги, содержащие систематическое рассмотрение магнитных умножителей частоты [2-5]. Практическая необходимость создания общей теории иллюстрируется хотя бы тем фактом, что эффективный способ улучшения свойств умножителей путем их подмагничивания с промежуточной частотой предложен, применен и довольно серьезно исследован [20, 70, 71], но все-таки подробно не объяснен. При наличии строгой теории как этот, так и другие пока неизвестные, но, вероятно, существующие способы усовершенствования магнитных умножителей можно было бы предсказать.

На принципиальную возможность создания единой теории магнитных умножителей частоты указывает обстоятельство, что во всевозможных схемных разновидностях основным элементом для уравнивания определенной доли питающего напряжения и генерирования составляющей электродвижущей силы с желаемой выходной частотой является единичный нелинейный индуктивный элемент. По существу в этом элементе происходит более или менее совершенный процесс преобразования электроэнергии с входной частотой в энергию с выходной частотой. Схема умножителя в целом должна обеспечить: 1) создание оптимальных условий для преобразования энергии в каждом единичном элементе, 2) беспрепятственное суммирование порций энергии на желаемой новой частоте и 3) ограждение выделения энергии на нежелательных частотах. Конкретные схемы выполняют эти задачи с различной эффективностью. Общая теория предсказала бы предельные возможности выделения желаемой гармоник, а также указала бы на принципы создания оптимальной реальной схемы. Интересной работой в этом направлении является [30].

Оправданное стремление к обобщению теории магнитных умножителей частоты не должно ограничивать работ по уточнению теории конкретных умножителей с целью их более совершенного использования. Ниже выдвигаются два частных вопроса, окончательное решение которых позволяет уточнить теорию работы простейшего магнитного умножителя — удвоителя частоты.

**1.1. О схеме замещения удвоителя.** Признаком существования точной теории какого-либо устройства является наличие точной модели или схемы замещения, как это существует, например, для трансформатора или асинхронного двигателя.

К сожалению, для удвоителя частоты хорошей схемы замещения не имеется. В качестве модели используется эквивалентный генератор [8, 13, 18, 52] с э.д.с., равной напряжению холостого хода  $U_{20}$  удвоителя, и с внутренним индуктивным сопротивлением

$$X_r = \frac{U_{20}}{I_{2k}},$$

где  $I_{2k}$  — ток короткого замыкания удвоителя.

Выходной характеристикой такой модели является четверть эллипса, что, особенно при емкостной компенсации, а также в случае прямоугольной кривой намагничивания не согласуется с действительной вы-

ходной характеристикой. Эквивалентное внутреннее сопротивление  $X_T$  должно позволить учитывать две причины спада внешней характеристики — остаточную индуктивность насыщенных элементов и связь между максимальным выходным током и током подмагничивания. Так как физическая сущность этих двух причин различна, то в имеющейся схеме замещения  $X_T$  не имеет четкого физического содержания.

Уточнение схемы замещения неизбежно вызывает ее осложнение. Рассмотрим точную схему замещения удвоителя по схеме Жоли—Эпштейна для случая, когда допустимо аппроксимирование кривой намагничивания тремя линейными участками по рис. 1, а (кривая III). Все обмотки предполагаем по числу витков одинаковыми. Процесс преобразования энергии в таком случае рассмотрен в [36].

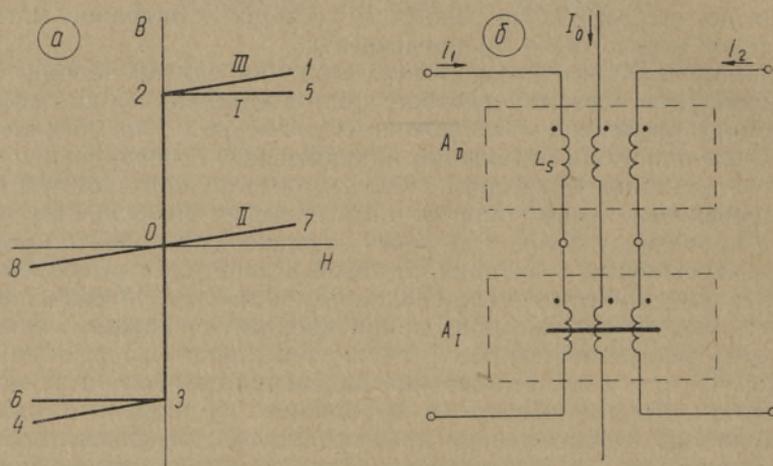


Рис. 1. а — Разложение нелинейной кривой намагничивания III (1—2—0—3—4) на составляющие I (5—2—0—3—6) и II (7—0—8); б — соответствующая схема замещения нелинейного трансформатора.

Нелинейную кривую III можно разложить на прямоугольную (I) и линейную (II) составляющие. Поэтому каждый из двух нелинейных трансформаторов A и B в схеме удвоителя также можно разложить на две составляющие I и II по рис. 1, б. Число витков всех обмоток на рис. 1, б равняется числу витков исходного трансформатора. Когда сердечник трансформатора  $A_I$  не насыщен, то

$$i_1 + i_2 + I_0 = 0$$

и при любой нагрузке в работе участвует только  $A_I$ . Когда  $A_I$  насыщен, рабочий процесс происходит в трансформаторе  $A_{II}$ . Обозначим индуктивность одной обмотки линейных трансформаторов  $A_{II}$  и  $B_{II}$  через  $L_S$ .

Схема замещения удвоителя (рис. 2, а) получена сложением двух схем замещения нелинейного трансформатора (см. рис. 1, б). В схеме рис. 2, а возможны четыре состояния, охарактеризованные в нижеследующей таблице.

Состояние 4 существует только при сопротивлении нагрузки меньше критического. (Критическим названо сопротивление нагрузки, при котором амплитуда выходного тока равняется току подмагничивания). Как

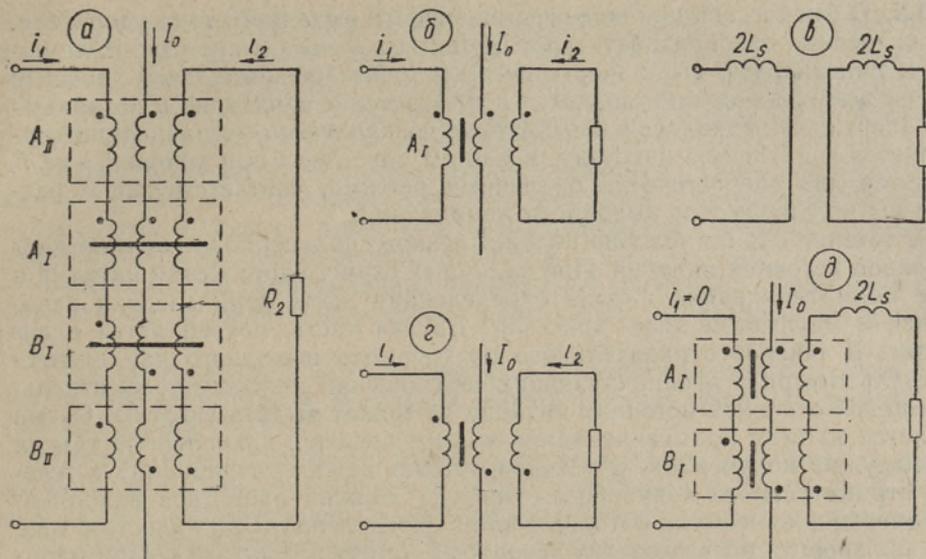


Рис. 2. Схемы замещения магнитного удвоителя частоты.

видно, несмотря на сложность общей схемы замещения, для отдельных состояний они довольно просты. Их можно получить из общей схемы путем соответствующих переключений. В простейшем случае, когда  $L_s = 0$  и ограничиваются областью работы  $i_2 \leq I_0$ , схемой замещения удвоителя Жюли—Эпштейна является только переключатель, который коммутует входное напряжение в середине каждого полупериода. В самом удвоителе бесконтактные переключения происходят в результате периодического насыщения сердечников. На сходстве работы магнитных умножителей с переключающими схемами основано предложение о построении умножителей частоты на базе управляемых вентилях [72], а также объяснение работы магнитных умножителей, исходя из схем с выключателями [73].

Характеристика возможных состояний в схеме рис. 2, а

№	Состояние схемы		№ схемы замещения	Передача энергии между входной и выходной цепями
	Насыщен	Не насыщен		
1	$B_I$	$A_I$	2, б	Через $A_I$
2	$A_I$ и $B_I$	—	2, в	Отсутствует
3	$A_I$	$B_I$	2, г	Через $B_I$
4	—	$A_I$ и $B_I$	2, д	Отсутствует, выходная цепь питается из цепи подмагничивания

Хотя схемы замещения удвоителя рис. 2 и облегчают точный анализ рабочих процессов, все же из-за относительной сложности они не могут найти универсального применения. Работа по разработке точных и в то же время достаточно простых схем замещения как магнитных удвоителей, так и вообще умножителей частоты должна продолжаться.

**1.2. О физической причине ограниченности выходного тока удвоителя.** Исследование преобразовательного процесса в магнитном удвоителе частоты показало [36], что с энергетической точки зрения задачей дросселя в цепи подмагничивания является периодическое запасание и возвращение энергии. Предполагая прямоугольную кривую намагничивания сердечников и активную нагрузку, в работе удвоителя при условии  $i_2 \leq I_0$  имеются два энергетически различных режима, соответствующие различным полупериодам выходного напряжения.

В течение одного условно положительного полупериода энергию дает основной источник питания. При заданных схеме, напряжении питания и токе подмагничивания вполне определенная часть этой энергии запасается в магнитном поле дросселя. Другая часть потребляется в нагрузке. В течение отрицательного полупериода выходного напряжения в результате ряда ограничивающих соотношений между токами отдельных цепей основной источник питания не может выдать энергию. Схема питается из цепи подмагничивания за счет энергии, накопленной там за предыдущий полупериод. В установившемся режиме отдаваемая в течение отрицательного полупериода энергия должна равняться накопленной энергии, количество которой вполне определено. При холостом ходе вся эта энергия возвращается основному источнику питания. При наличии нагрузки выдаваемая дросселем энергия распределяется между нагрузкой и источником питания. С увеличением нагрузки до критической в ней выделяется максимально возможная этой энергии, в то время как в источник питания ее поступает относительно минимальное количество. Последнее зависит от формы питающего напряжения и при прямоугольной форме равняется нулю. Таким образом, максимально возможное значение выходного тока за отрицательный полупериод определяется условием, что вся энергия, генерируемая цепью подмагничивания, потребляется в нагрузке. В случае дальнейшего уменьшения сопротивления нагрузки ограниченность тока в отрицательном направлении вызывает искажение и быстрое уменьшение выходного напряжения, а соответственно и спад внешней характеристики.

Из энергетического объяснения ограниченности выходного тока следует ряд рекомендаций для ликвидации такой ограниченности, что в итоге еще раз подтверждает плодотворность энергетического рассмотрения процессов, протекающих в магнитных умножителях. Расширение таких исследований [5, 33, 36, 74] весьма целесообразно.

Наиболее существенным выводом по вопросу устранения спада внешней характеристики является то, что элементарный удвоитель следует нагружать только в течение положительного полупериода выходного напряжения. Такой способ увеличения жесткости выходной характеристики можно истолковать и как введение внутренней положительной обратной связи или самонасыщения [19, 30]. Наряду с опубликованными схемами возможны и некоторые другие, часть которых в настоящее время исследуется в Институте термofизики и электрофизики АН ЭССР.

## 2. Преобразователи частоты на базе магнитных усилителей

При помощи магнитных умножителей и делителей можно получить фиксированные частоты. Регулирование их выходной частоты возможно только ступенчато и требует переключений в схеме. Тем самым снижается основное преимущество магнитных преобразователей частоты — надежность. Кроме того, вес магнитных делителей быстро растет с уменьшением выходной частоты. Получение относительно компактных и

надежных источников регулируемой низкой частоты возможно на базе управляемых или автоколебательных магнитных усилителей. Нижний предел для выходной частоты отсутствует, так как габариты магнитных усилителей определяются не выходной, а питающей частотой. Верхний предел определяется возможным быстродействием усилителя.

Предложено два типа источников регулируемой частоты на базе магнитных усилителей. В обоих случаях выходное напряжение модулируется, что вызывает появление дополнительных, боковых частот в спектре выходного напряжения усилителя.

В первом типе схем выходное напряжение магнитных усилителей выпрямляется, и полезная энергия выделяется на частоте модуляции [24, 25].

Во втором случае полезная энергия выделяется на одной из боковых частот, что достигается благодаря использованию принципа многофазной модуляции [23, 75, 76].

Область целесообразного применения этих интересных схем в обоих случаях ограничивается инерционностью магнитных усилителей. В первом случае ограничивающим фактором является также пониженный к.п.д. вследствие неизбежных потерь в схемах выделения желаемой частоты. Поэтому повышение быстродействия магнитных усилителей и определение предельного к.п.д. схем выделения переменной составляющей из пульсирующего напряжения являются наиболее актуальными проблемами при разработке преобразователей частоты на базе магнитных усилителей.

**2.1. О предельной частоте модуляции магнитных усилителей.** В существующих преобразователях частота модуляции не превышает  $1/3$  частоты питания [25, 77]. Но эту частоту нельзя считать предельной. Исследования автоколебаний трехфазного мостового магнитного усилителя в Институте термодинамики и электрофизики показали, что при активно-индуктивной нагрузке частота модуляции может даже превышать частоту питания. В качестве верхнего предела частоты автомодуляции экспериментально достигнуто 1,2 частоты питания. Естественно, что частоты, которые достигнуты в режиме автоколебаний, можно получить также при внешнем управлении, так как в обоих случаях равное увеличение выходной частоты есть результат одинакового ускорения переходных процессов. Весь вопрос сводится к выбору целесообразных способов ускорения как нарастания, так и убывания управляющего магнитного потока. К настоящему времени для ускорения переходных процессов в активно-индуктивных нагрузках разработано большое количество различных схем, некоторые из них и в нашем коллективе [78-82]. В связи с началом развития магнитных источников регулируемой частоты несомненно актуальным станет и конкретный анализ их применимости для повышения частоты модуляции магнитных усилителей. Нам кажется, что именно для этой цели схемы ускорения с повторным использованием энергии убывающего магнитного поля [78-82] вследствие их простоты и эффективности могут иметь некоторые преимущества по сравнению с другими схемами.

**2.2. К.п.д. выделения переменной составляющей.** Предложенные магнитные преобразователи с частотой модуляции на выходе основываются на схемах реверсивных магнитных усилителей с выходом на постоянном токе. Относительно низкий к.п.д. таких схем является более серьезным недостатком, чем инерционность магнитных усилителей, которую можно преодолеть хотя бы повышением частоты питания схемы. Достижение в

реверсивных схемах теоретического к.п.д. 50% не вызывает возражений. В [83] доказывается, что в некоторых случаях это является и теоретическим пределом. В то же время неоднократно высказано мнение о принципиальной возможности получить и более высокий теоретический к.п.д. [83–85]. Такие стремления представляют большой интерес. Несомненно, для каждой схемы существует вполне определенный максимальный теоретический к.п.д. Но нам кажется, что во избежание ошибок его следует определять по более общим закономерностям, чем это сделано до сих пор. Как легко такие ошибки могут возникнуть, иллюстрируют предложенные реверсивные схемы без балластных сопротивлений [86, 87]. Эти схемы не могут работать, так как в них не учтено, что индуктивный элемент может препятствовать прохождению тока от постоянной составляющей напряжения только в течение ограниченного времени. В [83] подвергается сомнению максимальный к.п.д. 66,6% в схеме Бальяна [84]. По нашему мнению, ошибка в [84] является следствием учета потерь только в одном балластном сопротивлении. Ниже показан один из возможных более общих путей для определения теоретического к.п.д. выделения переменной составляющей из пульсирующего напряжения при помощи схем без коммутирующих элементов. Это должно дать ответ и на вопрос о предельном к.п.д. магнитных преобразователей с частотой модуляции на выходе, так как в этих схемах магнитные усилители являются именно источниками пульсирующего напряжения. В существующих схемах применяется два источника пульсирующего напряжения. (Можно иметь также преобразователь частоты с одним источником пульсирующего напряжения и соответственно одним периодическим накопителем энергии [88]). Но число источников не может изменить максимального теоретического к.п.д. Это аналогично тому, что многие свойства магнитных умножителей можно определить на основе анализа процессов в отдельном сердечнике [30, 74]. Наличие нескольких сердечников в схеме умножителя и двух или нескольких источников пульсирующего напряжения в рассматриваемых магнитных преобразователях может только облегчить создание удовлетворительной схемы для выделения желаемого продукта.

Схема замещения источника пульсирующего напряжения, например, на базе магнитного усилителя изображена на рис. 3. Схема состоит из идеального

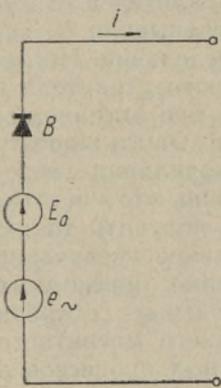


Рис. 3. Схема замещения источника пульсирующего напряжения.

вентилля  $B$  и эквивалентных генераторов постоянной и переменной составляющих пульсирующего напряжения

$$e = E_0 + e_{\sim} = E_0 + \sum_{k=1}^n E_{mk} \sin(\omega_k t + \varphi_{ek}) \geq 0.$$

Во время работы общий ток

$$i = I_0 + i_{\sim} = I_0 + \sum_{k=1}^l I_{mk} \sin(\omega_k t + \varphi_{ik}) \geq 0,$$

причем в общем случае  $n \neq l$ .

В течение периода  $T_1$  основной частоты источник выдает энергию на постоянном токе в количестве

$$W_0 = E_0 I_0 T_1$$

и на переменном токе в количестве

$$W_{\sim} = W_{\sim 1} + W_{\sim 2} + \dots + W_{\sim n} = T_1 (E_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + E_n I_n \cos \varphi_n).$$

Если в схеме по предположению отсутствуют коммутрующие элементы, то выданную энергию постоянного тока невозможно преобразовать в энергию переменного тока. Если полезным считается только  $W_{\sim}$ , то  $W_0$  составляет неизбежные потери. Компоненты энергии переменного тока  $W_{\sim 1}$ ,  $W_{\sim 2}$ , ...  $W_{\sim n}$  в случае линейной цепи потребляются без преобразования частоты. В случае нелинейной цепи возможно превращение частоты компонентов генерированной энергии, в том числе в результате выпрямления, и преобразование в энергию постоянного тока.

Предполагаем, что всю энергию  $W_{\sim}$  удастся направить в нагрузку. В этом случае к.п.д. выделения переменной составляющей

$$\eta = \frac{W_{\sim}}{W_{\sim} + W_0} = \frac{W_{\sim}}{W_0} : \left( \frac{W_{\sim}}{W_0} + 1 \right).$$

К.п.д. возрастает вместе с соотношением  $W_{\sim}/W_0$ . Поэтому предельный к.п.д. определяется предельным значением

$$\frac{W_{\sim}}{W_0} = \frac{\sum_1^n E_k I_k \cos \varphi_k}{E_0 I_0},$$

что при заданной форме пульсирующего напряжения с учетом условий

$$E_0 + e_{\sim} \geq 0 \text{ и } I_0 + i_{\sim} \geq 0$$

можно определить.

По такой методике удастся найти максимальный теоретический к.п.д. для различных случаев: полезной является вся переменная составляющая, только одна из гармоник и т. д. Не продолжая в этой статье более конкретного анализа, отметим, что для выделения переменной составляющей в целом максимальный теоретический к.п.д. приближается к 100% при уменьшении относительной длительности отдельного импульса пульсирующего напряжения. При выделении одной гармоники пределом является 50%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейгер В. А., Схемы магнитных усилителей, М.—Л., 1959.
2. Вологдин В. П., Спицын М. А., Генераторы высокой частоты, Л.—М., 1935.
3. Рожанский Л. Л., Статические электромагнитные преобразователи частоты, М.—Л., 1959.
4. Geuyer W. A., Nonlinear-Magnetic Control Devices, McGraw-Hill, New York, 1964.
5. Бамдас А. М., Кулинич В. А., Шапиро С. В., Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз, М.—Л., 1961.
6. Krämer W., Elektrotechn. Z., 71, Nr. 8/9, 185—188 (1950).
7. Dahlgren F., Littke-Persson A. K., Static Frequency Transformers for Small Electric Motors, Kgl. tekn. högskolans handl., No. 47, Göteborg, 1951.
8. Рожанский Л. Л., Электричество, № 5, 57—63 (1951).
9. Harriot L. C., Proc. Nat. Electronics Conf., 9, 78—87 (1953).
10. Johnson L. J., Rauch S. E., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 73, 448—452 (1954).
11. Johnson L. J., Rauch S. E., Proc. I. R. E., 43, No. 2, 168—173 (1955).
12. Smith O. J. M., Salihi J. T., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 74, 99—106 (1955).

13. Biringer P. P., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part III, 75, 834—839 (1956).
14. McMurray W., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 75, 384—390 (1956).
15. Biringer P. P., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 75, 590—594 (1956).
16. Schohan G., Electr. Manufact., 57, No. 4, 136—141 (1956).
17. Friedlander E., Electrical Energy, 1, Oct, 55—60 (1956).
18. Батранин Ю. Е., Научн. зап. Львовск. политехн. ин-та. Сер. электротехнич., № 9, 3—29 (1956).
19. Dick G. M., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 79, 125—134 (1960).
20. Захаров Н. В., Бамдас А. М., Шапиро С. В., Авторское свидетельство № 161400 от 3. XII 62.
21. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 19, вып. 3, 33—42 (1963).
22. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Блинов И. В., Емельянов В. П., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Рогинская Л. Э., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 5—11 (1965).
23. Карташов Р. П., Разработка и исследование статических преобразователей частоты с многофазной модуляцией, Автореф. дисс., Киев, 1966.
24. DÜchling W., AEG Mitt., 53, Nr. 3/4, 133—140 (1963).
25. Милях А. Н., Кубышин Б. Н., Тонкаль В. Е., Магнитные аналоговые элементы, М., 1965, 121—126.
26. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Давыдова Л. Н., Магнитные аналоговые элементы, М., 1965, с. 133—137.
27. Dick G. W., Biringer P. P., Slemmon G. R., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 76, 497—504 (1957).
28. Straughen A., Biringer P. P., Slemmon G. R., Applic. a. Ind., No. 36, 58—66 (1958).
29. Покровский С. В., Научн. доклады высшей школы Электромеханика и автоматика, № 1, 82—101 (1958).
30. Krämer W., AEG Mitt., 49, Nr. 8/9, 372—385 (1959).
31. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 3, № 6, 119—122 (1960).
32. Батранин Ю. Е., Научн. зап. Львовск. политехн. ин-та, вып. 88, Вопросы теории электрических и магнитных цепей, № 2, 60—77 (1962).
33. Покровский С. В., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 5, № 2, 224—228 (1962).
34. Покровский С. В., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 6, № 6, 714—722 (1963).
35. Бенин В. Л., Раюшкин В. А., Рожанский Л. Л., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 7, № 1, 86—92 (1964).
36. Оявээр М. Р., Магнитные аналоговые элементы, М., 1965, с. 127—132.
37. Васка М. Р., Тр. Ин-та термофизики и электрофизики АН ЭССР. Вопросы преобразования электроэнергии, Таллин, 1965, с. 17—21.
38. Kusko A., Biringer P. P., Kinper H. P., Proc. Intermag Conf., Washington, D. C., 1965, pp. 7.5—1÷7.5—3, New York, 1965.
39. Мясоедов В. Е., Махин Ю. И., Изв. ВУЗов. Электромеханика, № 7, 797—799 (1966).
40. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 16, вып. 5, 44—60 (1960).
41. Рожанский Л. Л., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 3, № 8, 19—26 (1960).
42. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Блинов И. В., Емельянов В. П., Марбух В. А., Махин Ю. И., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 25—29 (1965).
43. Галочкин Н. А., Изв. ВУЗов. Энергетика, 1, № 5, 43—53 (1958).
44. Рожанский Л. Л., Тр. Харьковск. политехн. ин-та. Сер. электротехническая, 27, вып. 1, 19—23 (1959).
45. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Изв. ВУЗов. Электромеханика, 3, № 9, 80—87 (1960).
46. Шапиро С. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 16, вып. 5, 61—66 (1960).
47. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Блинов И. В., Рогинская Л. Э., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 19, вып. 3, 43—49 (1963).
48. Рожанский Л. Л., Бенин В. Л., Сенкевич И. Н., Раюшкин В. А., Магнитные элементы автоматики, телемеханики, измерительной и вычислительной техники, Киев, 1964, с. 338—343.
49. Рогинская Л. Э., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 40—45 (1965).
50. Бладыко В. М., Згировский М. З., Изв. ВУЗов. Энергетика, 8, № 6, 95—98 (1965).
51. Nasumi T., Tadokoge M., Kasahara H., Trans. IEEE, MAG-2, No. 3, 647—652 (1966).

52. Pasternak J., Przegl. elektrotech., 42, № 4, 169—171 (1966).
53. Рожанский Л. Л., Вестн. Харьковск. политехн. ин-та, № 9 (57), Специальные эл. машины и коммутация машин пост. тока, вып. 1, 48—52 (1966).
54. Бенин В. Л., Раюшкин В. А., Рожанский Л. Л., Сенкевич И. Н., Электромагнитные и полупроводниковые устройства преобразовательной техники, Киев, 1966, с. 91—101.
55. McMurray W., Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs., Part I, 76, 289—293 (1957).
56. Бамдас А. М., Блинов И. В., Шапиро С. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 17, вып. 2, 14—30 (1961).
57. Бамдас А. М., Блинов И. В., Шапиро С. В., Изв. ВУЗов. Энергетика, 4, № 7, 35—44 (1961).
58. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Вестн. электропром-сти, 34, № 7, 67—70 (1963).
59. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Магнитные элементы автоматики, телемеханики, измерительной и вычислительной техники, Киев, 1964, с. 155—163.
60. Leusden G. P., Internat. Z. Elektrowärme, 23, Nr. 10, 455—461 (1965).
61. Максимович Н. Г., Батрагин Ю. Е., Изв. ВУЗов. Энергетика, 1, № 10, 49—58 (1958).
62. Bell G. M., Electro-Technology, 66, No. 5, 94—102 (1960).
63. Samras M., Electr. Engng., 81, No. 9, 699—705 (1962).
64. Geuyer W. A., Electronics, 36, No. 18, 58—61 (1963).
65. Geuyer W. A., Trans. IEEE, MAG-1, No. 1, 49—53 (1965).
66. Блинов И. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 12—15 (1965).
67. Захаров Н. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 16—24 (1965).
68. Алексеев Л. Ф., Мельников В. С., Тр. Всесоюзн. электротехн. ин-та, вып. 73, 213—222 (1966).
69. Бальчунас П. И., Магнитные элементы промышленной автоматики, М. 1966, с. 96—103.
70. Блинов И. В., Статические ферромагнитные уосьмерители частоты, Автореф. дисс., Горький, 1965.
71. Захаров Н. В., Статические ферромагнитные учетверители частоты, Автореф. дисс., Горький, 1965.
72. Biringer P. P., Sen P. C., Proc. Interomag Conf., Washington, 1965, pp. 13.6-1÷13.6-8, New York, 1965.
73. Kranert W., AEG Mitt., 49, Nr. 8/9, 443—449 (1959).
74. Мелодиев Л. С., Труды Международного симпозиума по нелинейным колебаниям, т. 3, Приложения методов теории нелинейных колебаний к задачам физики и техники, Киев, 1963, с. 230—240.
75. Милях А. Н., Карташов Р. П., Электромагнитные процессы в преобразовательных устройствах, Киев, 1967 (в печати).
76. Карташов Р. П., Федий В. С., Электромагнитные процессы в преобразовательных устройствах, Киев, 1967 (в печати).
77. Тонкаль В. Е., Преобразование и стабилизация электромагнитных процессов, Киев, 1965, с. 61—72.
78. Сарв В., Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, 11, № 4, 263—271 (1962).
79. Хунт Ю. И., Магнитные элементы автоматики, телемеханики, измерительной и вычислительной техники, Киев, 1964, с. 72—75.
80. Сарв В. В., Тр. Ин-та термофизики и электрофизики АН ЭССР. Вопросы преобразования электроэнергии, Таллин, 1965, с. 22—28.
81. Сарв В. В., Хунт Ю. И., Тр. Ин-та термофизики и электрофизики АН ЭССР. Вопросы преобразования электроэнергии, Таллин, 1965, с. 43—57.
82. Хунт Ю. И., Тр. Ин-та термофизики и электрофизики АН ЭССР. Вопросы преобразования электроэнергии, Таллин, 1965, с. 58—70.
83. Волков И. В., Быков Л. Н., Тонкаль В. Е., Электромагнитные процессы в преобразовательных устройствах, Киев, 1967 (в печати).
84. Бальян Р. X., Автоматика и телемеханика, 17, № 2, 160—171 (1956).
85. Милях А. Н., Тонкаль В. Е., Электромагнитные и полупроводниковые устройства преобразовательной техники, Киев, 1966, с. 24—32.
86. Бальян Р. X., Авторское свидетельство № 100603 от 14. IV 1954.
87. Бальян Р. X., Авторское свидетельство № 101679 от 14. IV 1954.
88. Сарв В. В., Электромагнитные процессы в преобразовательных устройствах, Киев, 1967 (в печати).

V. SARV

**ENERGEETILISED MAGNETILISED SAGEDUSMUUNDAJAD**

Artiklis on viimaste aastate tööde alusel iseloomustatud olukorda energeetiliste magnetiliste sagedusmuundajate alal ning formuleeritud mõned edasise uurimistöö pakilisemad ülesanded: sageduskordistajate aseskeemide ning energeetilise protsessi täpsustamine ja kordistajate ühtse teooria loomine; magnetvõimendite baasil kujundatud reguleeritava sageduse allikates siirdeprotsesside kiirendamine ja vahelduvkomponendi eraldamise kasuteguri piirväärtuse määramine.

V. SARV

**POWER MAGNETIC FREQUENCY CONVERTERS**

Power supply of different consumers at the same frequency would restrain the technical progress; therefore a study of the process of frequency conversion and the creation of suitable frequency converters, including magnetic ones, on this basis is one of the principal subjects of electrotechnics. Although the main attention has been paid to the development of semiconducting converters, there has been not only renewed but even increased interest in magnetic frequency converters at present. The reliability of static magnetic devices and the possibility to separate consumers from power supply without separating transformers is the reason for such interest. This paper attempts to characterize the situation in power magnetic frequency converters and to formulate some urgent problems of further investigation on the basis of the studies that have been made during the last years (including the studies of the Institute of Thermophysics and Electrophysics of the Academy of Sciences of the Estonian SSR).

Magnetic frequency multipliers and adjustable frequency sources based on magnetic amplifiers can presently be included into the category of power magnetic frequency converters. In the studies of the Gorky Polytechnical Institute the power use of magnetic frequency dividers is also predicted. The use of magnetic frequency multipliers is extending; it is restricted, however, by their bigger weight in comparison with transformers, by their small power factor, large no-load current and in many cases by a restricted output current at a given value of premagnetizing current. At the same time the limit possibilities of reduction of these disadvantages have not been investigated completely. At present the study of two effective ways, namely premagnetizing with the current of intermediate frequency and self-saturation, is proceeding. There is a sharp need of more generalized theory of magnetic frequency multipliers. This would enable to predict the principles needed for further improvements of multipliers. Both the design of the exact equivalent circuit for more simple type of multipliers and the elaboration of the investigation of energy conversion process in multipliers would conduce the formulation of such theory.

Both the acceleration of transients in adjustable output frequency converters based on magnetic amplifiers, and the increasing of efficiency of circuits separating alternative component from pulsating voltage are important for the further development of these converters. The present confusion in definition of theoretical efficiency of separating circuits can be settled by the definition of the efficiency on the basis of fundamental laws. One can show the maximum theoretical separating efficiency of the complete alternative component being 100 per cent. When separating any one of the harmonics by the circuit without commutating elements, the maximum theoretical efficiency is 50 per cent. Therefore magnetic frequency converters operating on the principle of multiphase modulation is of special perspective. In these circuits frequency conversion is not accompanied by inevitable losses.