

Анонс: Впервые в электронном виде приведены уникальные по информационной ёмкости, фундаментальных результаты по проблеме критичности состояний вентиляльных преобразователей электроэнергии.

Переход из режимов  $P \subset K_k$  в  $P \subset K_{k-1}$  отражает  $k$ -ю ( $P \subset P_{кр(k)}$ ), из  $P \subset Z$  в  $P \subset H$  или  $P \subset K_1$  — нулевую ( $P \subset P_{кр(0)}$ ), из  $P \subset H$  в  $P \subset K$  — граничную ( $P \subset P_{кр(r)}$ ) критичность состояний.

Перечисленные состояния являются основными для ВП. В общем случае возможны иные, в том числе более сложные режимы, представляющие комбинацию основных (например, режимы  $P \subset ZK$ ,  $P \subset Z_n K$  и т. п.) или принципиально отличающиеся от них [7, 8, 26]. Здесь они не рассматриваются из-за ограничения печатного объема. По этой же причине не приводятся результаты для полууправляемых схем, схем с обратными или «нулевыми» вентилями, с расщепленными дросселями или обмотками трансформаторов и т. п., требующие опубликования аналогичной систематизации.

Если критические параметры схем известны, то при заданных схемных параметрах можно легко определить тип режима, в котором находится реальный или будет работать проектируемый ВП. Необходимые для этого алгоритмы представлены в колонке 5. Алгоритмы просты, поскольку основаны только на логических операциях вида: «если больше, то», «если равно, то», «если меньше, то». При наличии альтернативных знаков ( $\cong$ ) нижний знак соответствует одной нижней, а верхний — одной или двум верхним стрелкам. Последние присутствуют в тех случаях, когда один и тот же по логике и структуре алгоритм распространяется на несколько классов. Эти две стрелки указывают соответственно на две альтернативы: если  $r, l \neq 0$ , схемы переходят в режимы типа  $P \subset K$ ; иначе, т. е. если  $r, l = 0$ , — в режимы типа  $P \subset H$ .

Проиллюстрируем сказанное на конкретных схемах. Так, например, для схем класса  $SmIR \parallel C_\infty$  [23] (см. табл. 1, № 36) символика алгоритма, указанная в 5-й колонке, читается так: если число  $m=1$ , схемы класса  $SmIR \parallel C_\infty$  работают в режиме типа  $P \subset Z$  независимо от значения обобщенной постоянной времени  $g_R = \omega l / R$ , т. е. независимо от того, на какие токи напряжения, мощности рассчитаны или эксплуатируются конкретные схемы; если же  $m > 1$ , то при  $g_R < g_{Rкр}$  схемы работают в  $P \subset Z$ , а при  $g_R > g_{Rкр}$  — в  $P \subset K$ . Исключение составляют здесь однофазные мостовые схемы, в которых при  $g_R > g_{Rкр}$  наблюдается режим  $P \subset H$  при одновременном существовании режима стабилизации.

Для схем последующего класса ( $SmLR \parallel C_\infty$ , № 37) формула критичности и алгоритм оценки типа режима сохраняются, но параметр  $g$ , равный ранее  $\omega l / R$ , означает теперь  $\omega(l+L)/R$ . Если же в предыдущих схемах исключить внутренние индуктивности  $l_\mu$  ( $\mu = \overline{1, m}$ ), получим схемы класса  $SmLR \parallel C_\infty$  (№ 35), для которых определяющий параметр  $g_L$  означает теперь не  $\omega l / R$ , но и не  $\omega(l+L)/R$ , а  $\omega L / R$ . Причем, если  $g_L > g_{Lкр}$ , схемы этого класса работают только в режиме типа  $P \subset H$ , на что и указано в алгоритме колонки 5.

Аналогично для схем с несинусоидальными э.д.с. (классов  $EmER_0R \parallel C_\infty$ ,  $EmrER \parallel C_\infty$  и  $EmrER_0R \parallel C_\infty$ , № 60, 61, 62) приведенный алгоритм читается так: если  $m < 3$ , схемы всех трех классов работают в режиме  $P \subset Z$  независимо от значений определяющих параметров  $a, n, \varepsilon$ ; если же  $m > 2$ , то при значениях  $N=1/n, a, \varepsilon$ , превышающих критические (знак  $>$ ), любые схемы всех трех классов работают в режиме  $P \subset Z$ , а при их значениях, меньших критических (знак  $<$ ), схемы классов  $EmrER \parallel C_\infty$  и  $EmrER_0R \parallel C_\infty$ , для которых  $r_\mu \neq 0$ , работают в  $P \subset K$ , а схемы класса  $EmER_0R \parallel C_\infty$ , для которых  $r_\mu = 0$ , работают в  $P \subset H$ .

Расшифровка алгоритмов для остальных классов схем аналогична. Как видим, для пользования алгоритмами необходимо знать, какие конкретные параметры определяют физические состояния схем и, следовательно, чему равно их минимальное число. В табл. 1, 2 эти сведения даны в колонке 4, из которой видно, что наряду с  $m$  (или  $M$ ) к определяющим па-

<sup>1</sup>Начало (стр. 1-19) с тем же названием см. в НЭА РАЕ. Рубрика: 43. Общие и комплексные проблемы естественных и точных наук. Материалы общего характера. URL: [www.econf.rae.ru/article/](http://www.econf.rae.ru/article/)

раметрам схем отнесены также следующие обобщенные безразмерные величины [7, 8, 12–14, 19, 20, 22–26]:

$g$  — обобщенные постоянные времени соответствующих частей схем, например обобщенная постоянная времени емкостного фильтра —  $g_c = \omega RC$  (см. классы № 13, 23, 32–34, 38–40 и т. п.); обобщенная постоянная нагрузки индуктивного характера с индуктивным фильтром или без него —  $g_L = \omega L/R$  (классы № 14, 17, 35 и т. п.); обобщенная постоянная внутренних ветвей —  $g_n = \omega l/r$  (классы № 15, 42 НВП и 8, 17, 36 УВП); обобщенная постоянная взаимных ветвей —  $g_R = \omega l/R$  (классы № 19, 36, 82–84 НВП и 12, 21, 26 УВП) и т. д.;

$\delta = 1/g$  — обобщенные декременты затухания тех же частей;

$\varepsilon = E/S_a$  — относительная противо-э.д.с.;

$n = r/R = 1/N$  — относительное внутреннее сопротивление (например, сопротивления фазы трансформатора, вентиля, проводников, линий, гасящих резисторов и т. п.), инверсное относительно сопротивлению нагрузки  $N = R/r$ ; иные значения взаимно инверсных параметров  $n = 1/N$  и  $g = 1/\delta$  указаны в примечании к таблицам;

$\Psi_\nu$  и  $a_\nu = S_{a\nu}/S_{a1}$  — фаза и относительная амплитуда  $\nu$ -й гармоники ( $\nu = \overline{1, \nu_x}$ ) при полигармонических фазных э.д.с.  $\mathcal{E}_\mu = \sum_\nu S_{\mu\nu}$  (см. классы № 51–74, где для относительной амплитуды 3-й гармоники схем классов № 51–68 с бигармоническими э.д.с. вида  $\mathcal{E}_\mu = S_{1\mu} + S_{3\mu}$  индекс 3 опущен и использовано упрощенное обозначение  $a = S_{a3}/S_{a1}$  [26]);

$\alpha, \alpha_0$  — угол управления, отсчитываемый соответственно от момента равенства нулю фазной (для мостовых схем — линейной) э.д.с. при ее положительной производной и от момента пересечения смежных э.д.с. по их огибающей, причем управляющими или регулируемыми элементами могут быть любые приборы ключевого типа, устанавливаемые на вторичной или/и первичной сторонах трансформатора или/и в продольную ветвь общей нагрузки за вентиляльным блоком ВП, а именно: тиратроны, экситроны, транзисторы, дроссели насыщения, магнитные усилители, тиристоры, симисторы, триаки и пр.

Таким образом, рассматриваемые вентиляльные структуры охватывают очень большое число конкретных практических схем, объединяя как неуправляемые, так и управляемые ВП, в том числе механические, ламповые, электронные, полупроводниковые, диодные, тиристорные, транзисторные, дроссельные, дискретные, интегральные, низковольтные, высоковольтные, слаботочные, сильноточные, мощные, маломощные, лучевые, мостовые, с однозвенными фильтрами, с многозвенными, с синусоидальными э.д.с., с несинусоидальными, с э.д.с. промышленной, инфранизкой или повышенной частот, работающие в режимах прерывистого выходного тока или непрерывного, с мгновенной коммутацией внутренних ветвей или при их «перекрытии»; в устройствах микроэлектроники, автоматики, защиты или в крупных системах современных средств вторичного электропитания, в том числе в различных энергосистемах и радиокомплексах.

Отметим также, что приведенные в табл. 1, 2 классы вентиляльных схем не ограничены каким-либо одним конкретным видом устройств, например выпрямителями, а охватывают довольно широкую их номенклатуру. Скажем, классы схем с № 13, 23, 32–34, 38–40 и др. объединяют целый ряд практических устройств, используемых в самых разных областях техники [19, 24]: различного вида и типа выпрямители и фильтры, устройства контуров стабилизации амплитуд колебания  $RC$ -генераторов, квазиниковые детекторы разнообразной измерительной аппаратуры, лучевые схемы преобразователей электромагнитных сепараторов, используемых на современных обогащительных фабриках, линейные амплитудные детекторы немодулированных сигналов, ячейки памяти или вентиляльные  $RC$ -интеграторы тональных посылок различной частоты (например, частоты 5000 Гц)

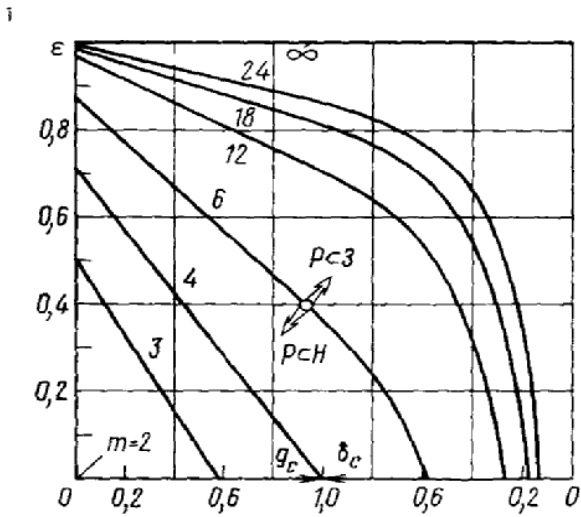


Рис. 1

Рис. 1. Режимный портрет вентиляльных схем классов  $SmER\|C$ ,  $SmE$ ,  $SmR\|C$  при  $m=2, 3, 4, 6, 12, 18, 24, \infty$

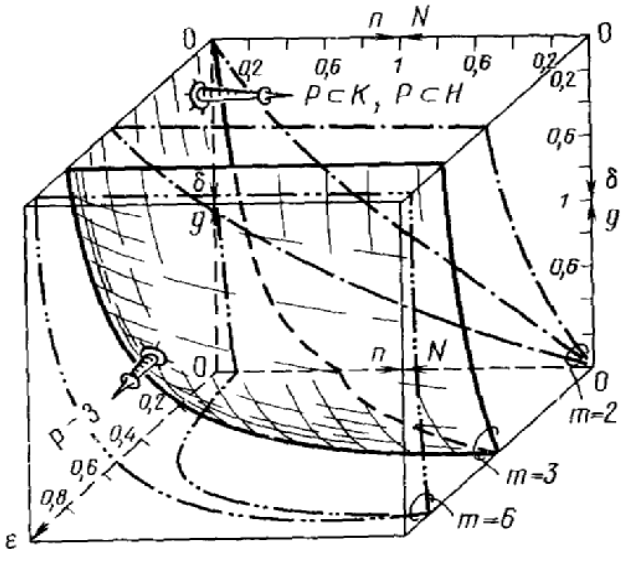


Рис. 2

Рис. 2. Режимный портрет вентиляльных схем классов  $SmER_6LR\|C_\infty$ ,  $SmrR\|C_\infty$ ,  $SmrER\|C_\infty$ ,  $SmrELR\|C_\infty$ ,  $SmrER_6LR\|C_\infty$ ,  $SmrER_6LR\|C_\infty$ ,  $SmlER_6LR\|C_\infty$ ,  $SmlrER\|C_\infty$ ,  $SmlrELR\|C_\infty$ ,  $SmlrR_6R\|C_\infty$ ,  $SmER_6R\|C_\infty$ ,  $SmlER_6R\|C_\infty$ ,  $SmR_6R\|C_\infty$ ,  $SmR_6LR\|C_\infty$ ,  $SmlrER_6R\|C_\infty$  и др. при  $m=2, 3, 6$

аппаратуры звукорежиссера, устройства стабилизации излучения твердотельных оптических квантовых генераторов непрерывного действия и многие другие вентиляльные структуры, имеющие разное функциональное назначение, но непременно содержащие емкостный накопитель в качестве важного элемента по аккумуляции и передаче электрической энергии, фильтрации переменной составляющей выходного напряжения, получению необходимой информации о преобразуемых сигналах или формированию новых сигналов управления.

Замкнутые уравнения связи критических значений определяющих параметров схем, условия их математической корректности или существования режимов и необходимые расшифровки даны в колонке 3 табл. 1, 2. Встречающиеся здесь верхние индексы, например 41, 52, 55, ..., приданные параметру  $N_{кр}$  соответственно в классах № 46–50, 60–62, 63–65, ..., указывают на использование в них критических значений параметра  $n$  ( $n=1/N$ ), найденного соответственно в классах № 41–45, 51–53, 54–56, ... Дополнительная расшифровка параметров  $n$  и  $g$  как для НВП, так и для УВП дана в примечании к табл. 2. Выводы приведенных формул критичности для ряда классов схем можно найти, например, в [7, 8, 12–14, 19–23]. Для остальных классов схем выводы аналогичны. Здесь они опускаются ввиду ограничения объема.

Соотношения, данные в колонке 3, позволяют для конкретных практических схем разработать режимные конструкции, которые более наглядно отражают континуум физических состояний различных типов и классов ВП. В зависимости от числа определяющих параметров континуум состояний может быть представлен в плоской (рис. 1) или объемной (рис. 2) геометрии. Конструкции режимных состояний даны для различных классов схем при наиболее распространенных на практике значениях числа  $m$ . На рис. 3 проиллюстрирована возможность разработки блочных конструкций, отражающих совокупность состояний сопрягаемых классов. Все построения выполнены по результатам решений на ЭВМ с использованием различных машинных языков, в том числе языков высокого уровня (АКИ, АЛГОЛ, ФОРТРАН и пр.).

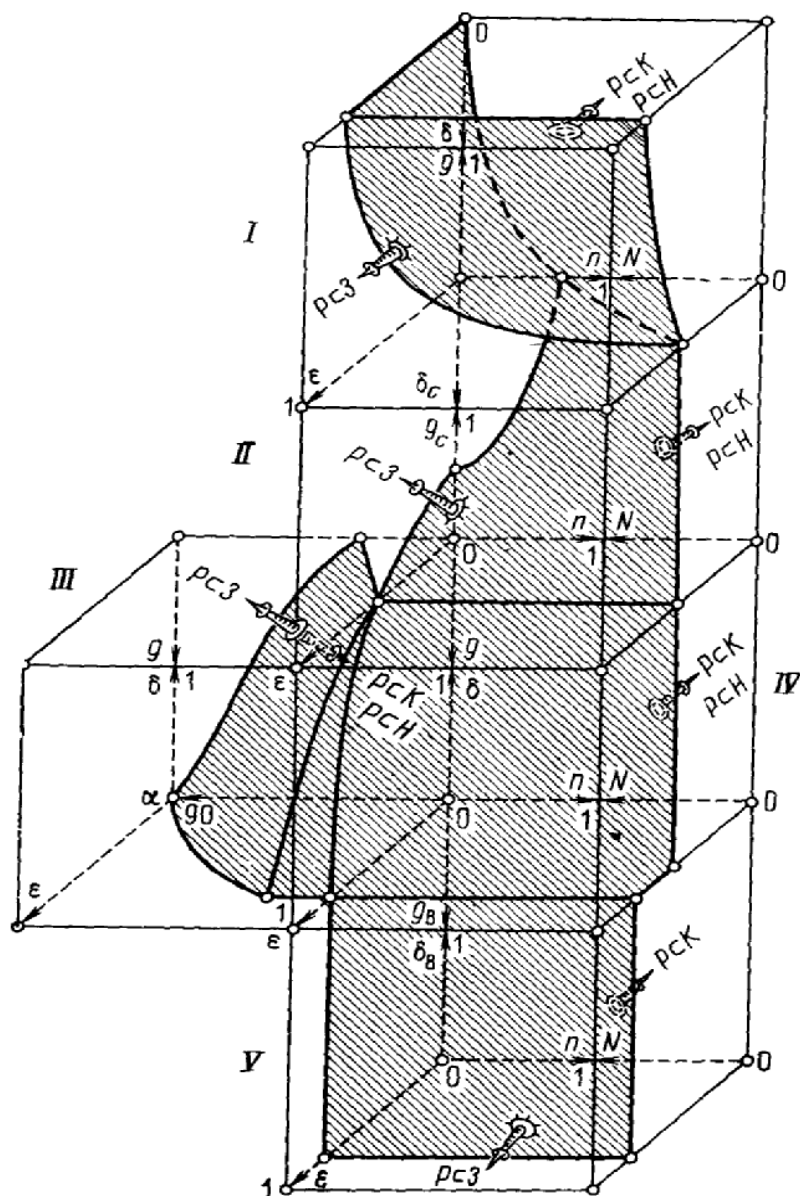


Рис. 3. Блочная режимная конструкция вентиляльных схем различных классов при  $m=3$ : I — то же, что на рис. 2, II —  $SmrR$ ,  $SmrER$ ,  $SmR\|C$ ,  $SmrER\|C$ ,  $SmR_0R\|C$ ,  $SmER_0R\|C$ ,  $SmrER_0R\|C$  и др., III —  $SamERL$ ,  $SamLER$ ,  $SamrE$ ,  $SamrEL$ ,  $SamLER$ ,  $SamLERL$ ,  $SamrERL$ ,  $SamrER$ ,  $SamE$ ,  $SamERL_\infty$ ,  $SamrERL$  и др., IV — то же, что в III, но без  $\alpha$ , V —  $SmrERL_\infty$

Обращение к номограммам обеспечивает большую наглядность и/или простоту и удобство операций по оценке типа режимов. При известных значениях определяющих параметров из плоских графиков легко определяется тип режима, в котором находится реальный или будет работать разрабатываемый ВП. Так, например, из рис. 1 видно, что при  $m=6$ ,  $g_c=1$  и  $\epsilon=0,01$  шестифазные лучевые или трехфазные мостовые схемы класса  $SmER\|C$  работают в режиме непрерывного тока с мгновенной коммутацией ветвей (режим типа  $P<H$ ). Но если в тех же схемах значение  $\delta_c = 1/\omega RC < 0,4$ , в них при любых значениях  $\epsilon$  наблюдается режим прерывистого выходного тока (типа  $P<3$ ) независимо от амплитуды  $S_a$  и  $E < S_a$ . При  $E > S_a$ , когда  $\epsilon > 1$ , вентили закрыты совсем, схемы не работают. Если же в схемах этого класса сопротивление нагрузки мало, такое, что  $g_c = \omega RC < 0,5$ , в них при том же  $\epsilon=0,01$  и любых  $m > 2$  существует только режим  $P<H$  независимо от типа схемы и мощности нагрузки.

Так же оперативно и просто осуществляется оценка типа режимов для остальных классов и типов схем. Требующиеся для этого режимные кон-

струкций, облегчающие труд пользователя, можно найти, например, в [12-14, 23, 25, 26]. В частности, в [25] содержится более 30 различных конструкций, охватывающих каждая от 1 до 9 различных классов с 1-5 типами схем.

Не имея возможности привести их в данной работе, в заключение укажем на основные плюсы предложенных аналитических и номографических способов по сравнению с экспериментальными: большее удобство, простота и наглядность, экономия средств, обусловленные снижением трудозатрат, исключением натуральных испытаний и обработки данных, а также высвобождение дорогостоящей сервисной аппаратуры и специалистов высокой квалификации.

**Выводы.** 1. Замкнутые уравнения связи критических параметров схемных структур ВП различных классов, их режимные конструкции и алгоритмы по оперативной оценке типа режимов, полученные на единой методической, физико-математической и терминологической основе, обеспечивают для большого количества конкретных практических устройств необходимое удобство, простоту и сравнительно высокие показатели качества и эффективности определения критических состояний схем, выявления типа рабочего или ожидаемого режимов работы по заданным значениям параметров схемных элементов и оценки общего числа возможных в схемах режимов при одновременной наглядности и экономии средств по сравнению с экспериментальными способами.

2. Представленные в обобщенном виде результаты позволяют абстрагироваться от конкретных значений токов, напряжений, мощностей реальных устройств и тем самым охватывают любые встречающиеся на практике случаи.

3. Уравнения критичности и разработанные на их основе режимные конструкции благодаря использованию определяющих параметров, изменяющихся в предельно возможном диапазоне значений (например, от 0 до  $\infty$ ), позволяют наглядно проследить параметрическую динамику физических состояний ВП и еще до начала исследования схем установить границы физической корректности математических результатов анализа электромагнитных процессов, протекающих в схемах, а также разрабатываемых на этой основе практических методов синтеза вентильных структур различных классов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *W. P. Overbeck*. Critical inductance and control rectifiers. PIRE, oct., 1939, v. 28, № 10.
2. *А. А. Булгаков*. Основы динамики управляемых вентильных систем. Изд-во АН СССР, 1963.
3. *J. L. Storr-Best*. Critical inductance for halfcontrolled thyristor rectifiers. Electr. Engr., april, 1966, v. 38, № 458.
4. *И. Л. Лавриченко, А. М. Репин, К. П. Собинов*. Анализ переходных процессов устройства «источник питания - накопитель - нагрузка». Материалы н.-т. конф. МЭИС. Изд. МЭИС, 1967.
5. *Р. Г. Орлова*. Граничные условия непрерывного тока в тиристорном электроприводе. Электричество, 1968, № 7.
6. *Ю. В. Попов*. Критическая индуктивность якорной цепи двигателя при питании от управляемого тиристорного преобразователя. Изв. вузов. Энергетика, 1969, № 8.
7. *А. М. Репин*. Об основных состояниях вентильных преобразователей и условиях их существования. Материалы январской н.-т. конф. МЭИС. Изд. МЭИС, 1970.
8. *А. М. Репин*. Критические режимы вентильных схем. Материалы апрельской н.-т. конф. ВЗЭИС. Изв. ВЗЭИС, 1970.
9. *Я. Ф. Анисимов*. Гармоники выходного напряжения и тока в 12-фазной вентильной системе. Труды НКИ, Николаев, 1970, вып. 39.
10. *М. М. Соколов, В. Х. Исаченко*. Построение внешней характеристики тиристорного преобразователя в области прерывистых токов. Электротехника, 1970, № 7.
11. *М. Г. Чиликин, В. П. Бычков, П. И. Чурсин и др.* О режиме прерывистых токов в вентильных преобразователях. Тр. V Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводе. «Энергия», 1971.



12. *A. Repin.* Lygintuvu kaip ARS grandziu, esant induktyviniam apkrovimui, rezimu portretai ir kai kurie teorijos aspektai. *Technine kibernetika*, 1973, № 5.
13. *A. M. Repin.* Конструкции физических состояний безреактивных управляемых схем как звеньев разомкнутых САР. Материалы н.-т. конф. КИИ, Каунас. Изд. КИИ, 1973.
14. *И. И. Белопольский, А. М. Repin, А. С. Христианов.* Стабилизаторы низких и милливольтовых напряжений. «Энергия», 1974.
15. *Б. В. Богданов.* К вопросу об установившихся режимах вентильных электроприводов. Изв. вузов. Электромеханика, 1973, № 9.
16. *R. Sajhen, V. Podlesnik.* Bemessung der Glättungsdrossel für nichtflückenden Betrieb in stromrichtergespeisten Gleichstromantrieben. MSR, В. 18, 1975, № 5.
17. *О. И. Данилевич.* Определение границы непрерывного и прерывистого тока выпрямителя. Сб. «Разработка и применение высокоэффективных устройств преобразовательной техники». Киев. Изд. ИЭД АН УССР, 1976.
18. *Р. А. Орещенко.* Границы прерывистого тока вентильных преобразователей. Электричество, 1977, № 6.
19. *А. М. Repin.* Параметрические состояния многовентильных схем с емкостным фильтром. Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая, 1977, № 9.
20. *А. М. Repin.* Расчет среднего тока полезной нагрузки вентильных преобразователей различных классов. МРС, сер. общетехн., Изд. ВИМИ, 1977, № 7 (3-5920).
21. *А. Ф. Синолицый, В. И. Бугенко.* Уточненный метод расчета критической индуктивности контура нагрузки тиристорных преобразователей. Изв. вузов. Энергетика, 1977, № 9.
22. *А. М. Repin.* О замкнутой форме инженерных методов проектирования выпрямителей. РЭА. Теоретическая электротехника. Изд. ЛГУ, Львов, 1977, вып. 23.
23. *А. М. Repin.* Исследование неуправляемых и управляемых выпрямителей с емкостным фильтром и внутренними индуктивностями. Изв. вузов. Энергетика, 1977, № 12.
24. *А. М. Repin.* Формулы скачков и некоторые теории вентильных структур. Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая, 1978, № 6.
25. *А. М. Repin.* Критические состояния и режимные конструкции вентильных структур различных классов. МРС, сер. Т., Изд. ВИМИ, 1978, № 34 (3-6020).
26. *А. М. Repin.* Особенности работы многовентильных схем класса  $\mathcal{E}tr R||C_{\infty}$  с бигармоническими ЭДС. МРС, сер. Т., Изд. ВИМИ, 1978, № 50 (3-6043).

94

Поступило 17 IV 1978 Подправлено 4 X 1979



Март 2005



Январь 1948



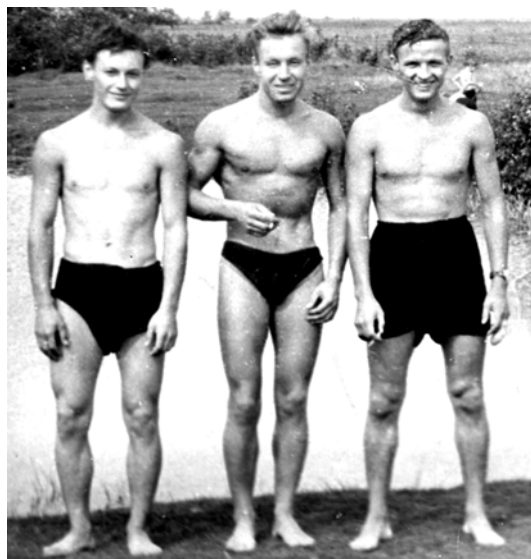
Сентябрь 1948



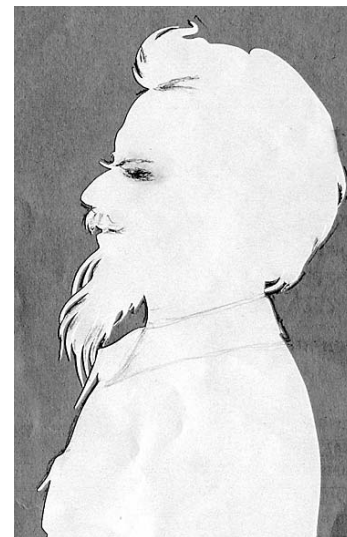
Октябрь 2005



Февраль 2001



Август 1954



Июнь 2002

© РЕПИН А.М. 1978. 3.5.2006. 5.1.2007. 8.9.2009. 9.11.2010