

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИНХРОНИЗАТОРОВ

А.Н. Малыш

(представил д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

*Изложены рекомендации по выбору силовой и измерительной частей стенда для испытаний устройств автоматической синхронизации. Предложены устройства для измерения угла включения и времени опережения синхронизатора.*

**Постановка проблемы.** Увеличение в системах автономного электро-снабжения числа электроприемников первой категории и ужесточение требований к качеству электрической энергии являются основными причинами отказа от самосинхронизации при включении синхронных генераторов на параллельную работу. Широкое внедрение в системах автономного электро-снабжения способа точной синхронизации в качестве основного способа включения генераторов на параллельную работу потребовало решения задачи ускорения процесса синхронизации. Успешное решение этой задачи в значительной степени затрудняется большой сложностью процессов, происходящих при синхронизации в случаях, когда значения начальных параметров синхронизации, особенно угла между синхронизируемыми напряжениями и угловой частоты скольжения, отличаются от значений, определяемых при идеальных условиях. В это же время, именно отказ от идеальных условий открывает большие возможности по ускорению процесса точной синхронизации. В подобной ситуации наряду с теоретическими исследованиями большое значение приобретает накопление экспериментальных данных. Важным источником получения таких данных должны стать натурные исследования процесса синхронизации в условиях предприятия-изготовителя.

Между тем, изучение существующих программ испытаний дизель-генераторов и других электромашинных источников энергии показывает, что в процессе испытаний не учитывается или просто недополучается много ценной информации. В некоторых случаях получаемая информация носит избыточный характер, что при использовании осциллографирования приводит к снижению точности получения основных данных. Подобное состояние сложилось объективно, так как при разработке программ и методик ставились вполне определенные задачи. Постановка новых задач,

связанных с испытаниями образцов устройств точной синхронизации, требует корректировки известных методик испытаний и поиску путей совершенствования испытательных стендов, как в их силовой части, так и в части оснащения соответствующей измерительной аппаратурой.

**Анализ литературы.** По данным, приведенным в [1 – 5], каждый стенд для проверки и настройки может быть разбит на две составные части:

- силовую, главной задачей которой является имитация реальных условий работы синхронизатора в системе электроснабжения;
- измерительную, обеспечивающую объективную оценку функционирования синхронизатора.

В простейшем случае испытания проводятся непосредственно на действующей электроустановке. При этом необходимость в силовой части как таковой отпадает, а задача создания стенда сводится к дополнению электроустановки необходимой аппаратурой специального назначения. При всей очевидной простоте подобное решение приводит к нерациональному расходу моторесурса агрегатов и в связи с этим применяется крайне редко. Более правильным является использование в качестве силовой части стенда специальных имитаторов, обеспечивающих выдачу на синхронизатор напряжений, частота и амплитуда которых могут изменяться в пределах, несколько больших, чем пределы, обеспечивающие нормальную работу синхронизатора.

Описанный в [2] стенд имитирует работу оборудования. Его блок «генератор» содержит три лабораторных автотрансформатора, включенных по схеме «звезда» и управляемых независимо. Фазные напряжения этого блока изменяются в диапазоне от 0 до 240 В.

В качестве блока «сеть» используется генератор промышленной частоты ГПУ-69 в блоке с усилителем мощности УМ-100 мощностью 100 Вт. Фазное напряжение блока изменяется в диапазоне от 0 до 240 В, частота изменяется в диапазоне от 45 до 55 Гц. Напряжение измеряется вольтметрами типа Э-335, для измерения частоты используется частотомер типа Д-506М. Для измерения времени опережения синхронизатора используется электросекундомер, пуск которого осуществляется выходным сигналом синхронизатора, а остановка – устройством фиксации момента совпадения векторов синхронизируемых напряжений, выполненным на базе реле направления мощности. Точное время опережения и его погрешность определяются путем осциллографирования. Авторы [5] предлагают производить проверку синхронизатора по узлам, используя для этого устройство для получения напряжения низкочастотных биений (рис. 1).

Напряжение биений формируется путем суммирования на резисторе R выходных сигналов генераторов звуковой частоты Г1 и Г2 типа ГЗ-33.

Однако эта схема применима только для синхронизаторов, работающих на биениях, и позволяет испытать только блок опережения, что не дает возможности оценить работу синхронизатора в целом.

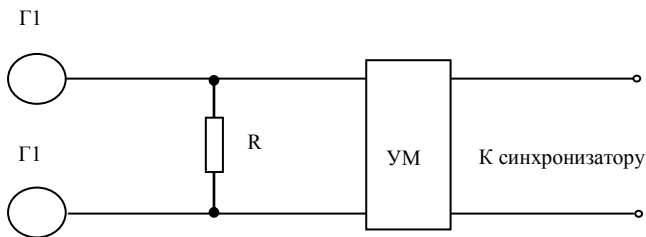


Рис. 1. Источник напряжения биений

Большие возможности и более современную элементную базу имеет генератор низковольтных биений, описанный в [4]. Структурная схема такого генератора представлена на рис. 2.

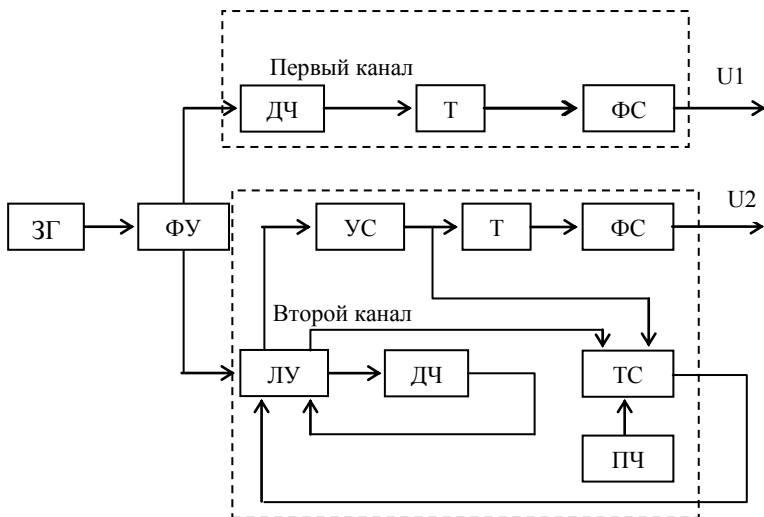


Рис. 2. Схема генератора биений

Напряжение с выхода задающего генератора ЗГ частотой 500 кГц преобразуется в формирующем устройстве ФУ в импульсы с крутыми передними фронтами, которые подаются на два канала деления частоты. В первом канале с помощью делителя частоты ДЧ и триггера обеспечивается деление частоты. Формирователь сигнала ФС обеспечивает получение синусоидального сигнала  $U_1$  частотой 50 Гц.

Во втором канале частота делится на коэффициент  $(5000 + n) / 2$ , где  $n$

может принимать целые значения в пределах от 1 до 50. Изменение  $n$  производится с помощью переключателя частоты ПЧ, воздействующего на тактовые счетчики ТС. Работа ТС, кроме того, определяется сигналами с выхода логического устройства ЛУ и устройства сброса УС, которое совместно с делителем частоты ДЧ обеспечивает коэффициент деления  $5000 + n$ . Деление на 2 и формирование синусоиды  $U_2$  производится с помощью триггера Т и формирователя ФС. Таким образом, частота напряжения  $U_2$  изменяется со ступенью, равной 0,01 Гц, в пределах 49,99 – 49,50 Гц. Плавное изменение частоты задающего генератора в диапазоне 480 – 510 кГц обеспечивает изменение частоты на выходе первого канала от 48 до 51 Гц. Основным недостатком описанного стенда – «однофазность» напряжений в обоих его каналах делает его непригодным для испытаний трехфазных синхронизаторов. Для работы с трехфазными синхронизаторами необходимо каждый из каналов дополнить фазорасщепителями и усилителями мощности. Однако при этом трудно обеспечить симметрию трехфазных систем напряжений.

Для уменьшения трудоемкости процесса обработки результатов испытаний в [3] предлагается устройство для измерения времени опережения, позволяющее отказаться от осцилографирования при вычислении этой величины. Описываемое в [3] устройство измеряет время от момента срабатывания синхронизатора до момента совпадения фаз синхронизируемых напряжений. При этом для фиксации момента совпадения фаз используется факт изменения порядка чередования фаз до и после момента совпадения фаз. Основным недостатком описанного устройства – сложность его схемной реализации.

Оценивая сложившуюся методику испытаний синхронизатора в целом, можно сказать, что она отличается универсальностью, но, вместе с тем, ей присущи такие серьезные недостатки, как большая трудоемкость и невысокая точность получения результатов. Эти недостатки обусловлены в основном устройством, схемой и составом оборудования испытательных стендов.

**Цель статьи.** Изложение путей совершенствования натуральных испытаний синхронизаторов в условиях заводов-изготовителей. При этом при выборе силовой части стенда и определении необходимого состава измерительной аппаратуры будем исходить из того, что основной целью испытаний является не только установка факта нормального функционирования синхронизатора, но также и создание предпосылок для его дальнейшего совершенствования в направлении повышения быстродействия и надежности.

Повышение эффективности процесса испытаний может быть достигнуто как путем совершенствования методики испытаний, так и путем совершенствования материально-технической базы испытаний. По первому направлению следует уточнить перечень величин, представля-

ющих интерес для оценки синхронизации и собственно синхронизаторов.

Все необходимые данные можно условно разбить на три группы. **В первую**, самую многочисленную группу, следует отнести паспортные данные о синхронных генераторах, их синхронных переходных и сверхпереходных реактивностях, реактивностях рассеивания, активных сопротивлениях статорных и роторных обмоток, данные о инерционных постоянных агрегатов и данные о времени включения выключателя генератора. **Ко второй группе** данных следует отнести параметры предварительного режима работы генератора: напряжение  $U_0$ , ток  $I_0$ , угол мощности  $\varphi_0$ , частоту  $f_0$  генераторов. Определение этих величин может быть произведено с помощью обычных электроизмерительных приборов. **В третью группу** величин должны быть отнесены остальные параметры режима, а именно те, которые непосредственно перед синхронизацией и в процессе синхронизации изменяются в достаточно широких пределах. Измерение этой группы величин требует применения специальной измерительной аппаратуры. К этой группе величин относятся: угол  $S$  между синхронизируемыми напряжениями, напряжения и токи обоих генераторов в процессе синхронизации, время  $t_{\text{он}}$  от момента подачи команды до момента замыкания контактов выключателя. Именно для измерения величин, входящих в третью группу, разрабатывается силовая часть испытательного стенда и используются специальные средства измерения.

Предлагается для создания силовой части стенда для проверки и настройки синхронизаторов использовать электромашинные преобразователи – трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором или трехфазный дифференциальный сельсин. При этом статор подключается к трехфазной сети, а ротор принудительно вращается в ту или иную сторону от специального электропривода, способного обеспечить изменение частоты вращения в необходимом диапазоне частот скольжения. Очевидно, что при разработке силовой части стенда достаточно ограничиться лишь одним электромеханическим устройством, имитирующим включаемый генератор, так как в качестве другого синхронизируемого напряжения возможно использовать напряжение внешней сети.

Один из возможных вариантов принципиальной схемы приведен на рис. 3. На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 – дифференциальный сельсин; 2 – электродвигатель постоянного тока, ротор которого связан с ротором дифференциального сельсина; 3 – усилитель мощности с регулируемой амплитудой; 4 – испытываемый синхронизатор.

Назначение дифференциального сельсина и приводного электродвигателя постоянного тока пояснений не требует. Усилитель мощности с регулируемой амплитудой позволяет расширить диапазон применения стенда и

сделать его универсальным и пригодным для испытаний синхронизаторов, как с малой, так и с большой мощностью. Возможность изменения амплитуды выходного напряжения позволяет, кроме того, испытывать синхронизаторы в условиях нестабильности питающих напряжений.

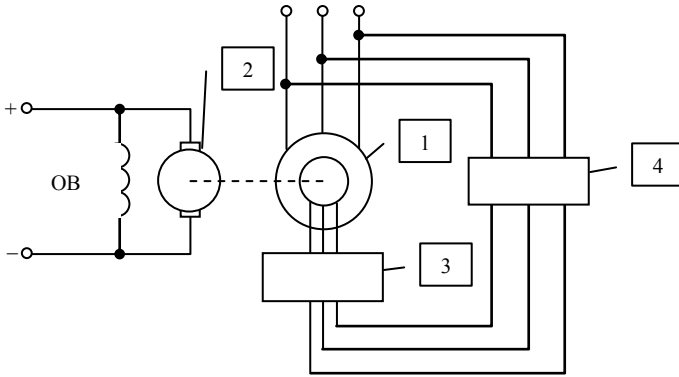


Рис. 3. Схема силовой части испытательного стенда

При разработке измерительной аппаратуры испытательного стенда необходимо обратить внимание на следующее. Традиционно сложившаяся методика испытаний синхронизаторов предполагает, как правило, определение начальных параметров синхронизации и параметров переходного процесса с помощью шлейфового осциллографа. При этом напряжения и токи определяются из осциллограмм непосредственно, а для нахождения частоты скольжения и угла между синхронизируемыми напряжениями обычно используется напряжение биений  $U_s(t)$ , позволяющее найти искомые величины.

При всей своей наглядности и простоте применяющаяся методика имеет существенные недостатки. Главный из них заключается в том, что по осциллограмме напряжения биений трудно определить мгновенное значение частоты скольжения  $f_s$  с приемлемой точностью. Невысокой, особенно при  $U_1 \neq U_2$  и при колебаниях синхронизируемых напряжений, оказывается также и точность определения угла  $\delta$ . Ошибки в определении величин  $f_s$  и  $\delta$  существенно возрастают при наличии ускорения скольжения  $\xi_s$  когда огибающая напряжения биений  $U_s$  отличается от синусоиды. Отмеченные недостатки могут быть устранены, если для измерения частоты скольжения использовать два цифровых частотомера, а для измерения угла использовать формирователь импульсной последовательности. Частотомеры должны быть переведены в режим дистанционного измерения времени с пуском от синхронизатора. В момент выдачи команды синхронизатором частотомеры измеряют мгновенные значения не самих частот  $f_r$  и  $f_c$ , а величины им обратных  $T_r$  и  $T_c$ , а ча-

стота  $f_s$  определяется следующим образом:

$$f_s = f_c - f_r = (T_r - T_c) / [T_r T_c]. \quad (1)$$

Формирователь импульсной последовательности, используемый для измерения величины угла, включает в своем составе формирователи импульсов Ф1 и Ф2 и триггер Т с управлением по раздельным входам. Формирователи импульсов преобразуют синусоидальные напряжения сети  $U_c(t)$  и генератора  $U_r(t)$  в последовательности коротких импульсов, фаза которых жестко привязана к входным синусоидам. На выходе триггера образуется импульсная последовательность  $U_r(t)$  прямоугольных импульсов переменной длительности, в которой и содержится информация об угле  $\delta$ . Действительно, в момент времени  $t_1$  факт несовпадения по фазе напряжений  $U_c$  и  $U_r$  проявляется в том, что между нулевыми точками этих синусоид имеется временной интервал  $\tau_1$ , которому на выходе триггера Т соответствует отрицательный импульс такой же длительности. Характер изменения длительности этого импульса с течением времени зависит от знака скольжения: при  $t_c > t_r$  длительность увеличивается, а при  $t_r > t_c$  она уменьшается.

При определении величины угла  $\delta$  учтем, что этот угол представляет собой, по существу, тот путь, который должен проделать более «быстрый» вектор в погоне за более «медленным» до их совпадения. Для рассматриваемого момента времени  $t_1$  и принятого соотношения частот  $f_c > f_r$  таким путем является отрезок времени  $T_c - \tau_1$ , которому соответствует угол  $\delta_1$ , равный

$$\delta_1 = (360/T_c) \cdot (T_c - \tau_1). \quad (2)$$

В момент времени  $t_2$  угол сдвига фаз между напряжениями  $U_c$  и  $U_r$  равен

$$\delta_2 = (360/T_c) \cdot (T_c - \tau_2). \quad (3)$$

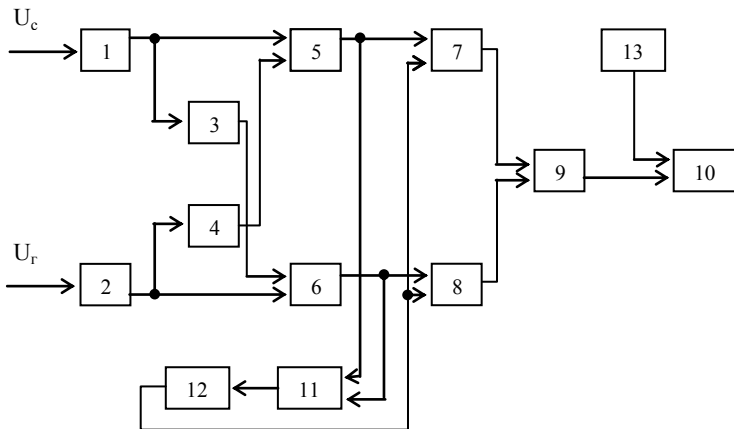
Если  $f_c > f_r$ , то угол  $\delta$  в момент времени, соответствующий заданному фронту отрицательного импульса длительностью  $\tau$ , определяется как

$$\delta = (360/T_c) \cdot \tau. \quad (4)$$

Таким образом, в формулах (2 – 4) для определения величины угла знаменатели представляют собой интервалы времени между передними фронтами соседних отрицательных импульсов триггера Т, а отсчет угла  $\delta$  должен производиться по заднему фронту отрицательных импульсов. Для измерения времени опережения разработано устройство, схема которого приведена на рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие работу устройства, приведены на рис. 5. Напряжения сети и генератора подаются на входы формирователей импульсов 1 и 2.

Напряжения сети  $U_c$  и генератора  $U_r$  в формирователях 1 и 2 преобразуются в последовательности прямоугольных импульсов постоянной

длительности  $\tau$ , жестко привязанных к началу периода соответствующих синусоид (рис. 5). Прямоугольные импульсы с выхода формирователей



поступают на один из входов промежуточной схемы совпадения 5(6) и через

Рис. 4. Схема устройства для измерения времени опережения

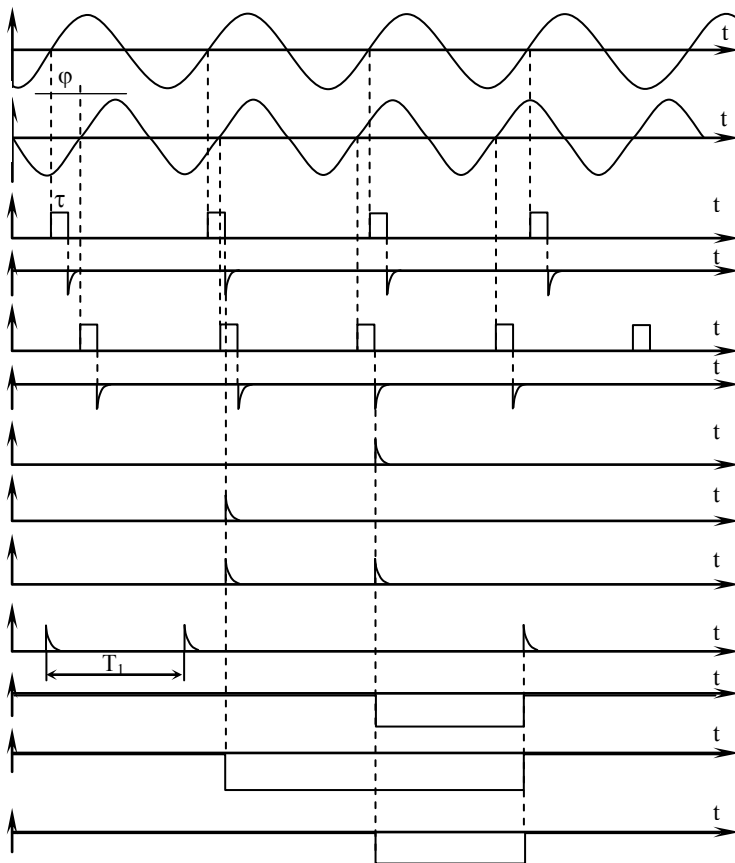




Рис. 5. Временные диаграммы

дифференцирующие блоки 3(4) перекрестно подаются на другие входы промежуточных схем совпадения. Если частота сети меньше, чем частота генератора, то величина текущего угла между напряжениями  $U_c$  и  $U_r$  постепенно уменьшается, приближаясь к нулю. После момента совпадения фаз синхронизируемых напряжений величина текущего угла скачком изменяет свое значение от 0 до  $360^\circ$  и начинает уменьшаться. При этом в момент времени, предшествующий совпадению фаз синхронизируемых напряжений, имеются сигналы на обоих входах промежуточной схемы совпадения 6, а в момент времени, непосредственно следующий за совпадением фаз, имеются сигналы на обоих входах промежуточной схемы совпадения 5. В случае, если частота сети больше частоты генератора, то очередность срабатывания промежуточных схем совпадения меняется.

Сигналы с выходов промежуточных схем совпадения 5 и 6 через собирательную схему 11 поступают на вход генератора импульсов 12 и запирают его, переводя в режим “молчания” и прекращая тем самым подачу сигналов с выхода генератора импульсов на нулевые входы триггеров 7 и 8. Период  $T_{12}$  следования импульсов генератора импульсов 12 выбран с таким расчетом, чтобы во всем диапазоне возможных частот скольжения он был больше периода следования импульсов с выхода собирательной схемы 11. Тем самым обеспечивается прохождение сигналов через триггеры 7 и 8, на выходную схему совпадения 9. Передний фронт сигнала на выходе схемы совпадения 9 используется для останова схемы измерения времени 10, запуск которой осуществляется в момент срабатывания синхронизатора 13. Таким образом, схема измерения времени работает от момента включения синхронизатора до момента совпадения фаз синхронизируемых напряжений, т.е. измеряет время опережения, обеспечиваемое синхронизатором.

Сбрасывание триггеров 7 и 8 в исходное состояние осуществляется генератором импульсов 12, который запускается после исчезновения импульсов на выходе собирательной схемы 11 и по истечении времени  $T_{12}$  подает импульсы на нулевые входы триггеров.

Оценка результатов проведенного анализа в целом показывает, что измерительную часть стенда по испытаниям синхронизаторов желательнее выполнять в соответствии с рис. 6. Целесообразно все регистрирующие приборы вывести на цифropечатающее устройство, что позволит существенно сократить время, затрачиваемое на обработку результатов испытаний. Протокол испытаний должен соответствовать схеме стенда. В протоколе должны отражаться сведения о значениях параметров режимов работы до и после синхронизации, паспортные данные генераторов, осциллограмма процесса синхронизации и результаты ее обработки,

содержащие сведения об угле  $\delta$  в момент подачи на включение выключателя, частоте скольжения  $f_c$  провале напряжения  $\Delta U$  и броске тока  $\Delta I$  в момент замыкания контактов выключателя.

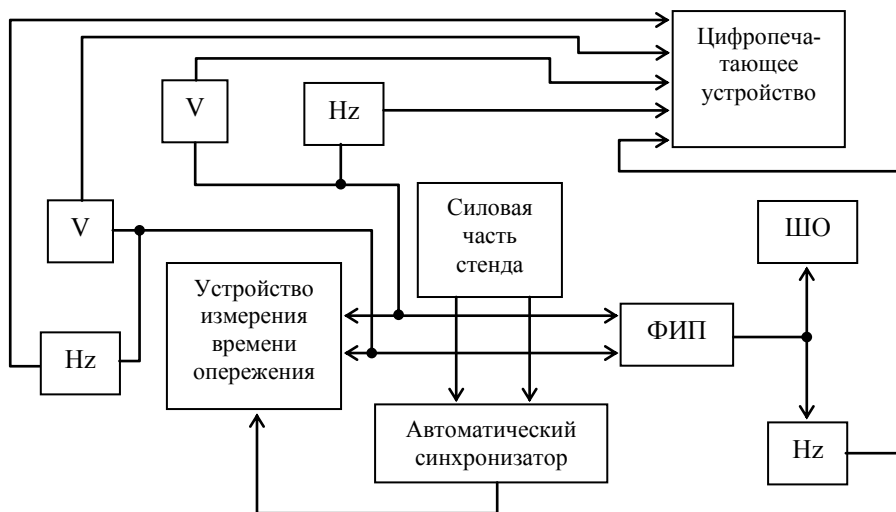


Рис. 6. Схема измерительной аппаратуры стенда

**Вывод.** Результаты проведенного анализа позволили обосновать требования к стенду испытаний синхронизаторов, предложить устройства для измерения угла включения и времени опережения, позволяющие обеспечить требуемую точность измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цимберов Л.Д. Стенд для наладки автосинхронизаторов // *Электрические станции*. – 1973. – № 10. – С. 85 – 86.
2. Рохленко И.В., Лозе А.Б. Генератор низкочастотных биений // *Электрические станции*. – 1976. – № 2. – С. 88 – 90.
3. Рохленко И.В., Лозе А.Б. Устройство для проверки автосинхронизаторов // *Электрические станции*. – 1975. – № 4. – С. 80 – 81.
4. Либер А.Б. Способ проверки автосинхронизаторов // *Электрические станции*. – 1967. – № 12. – С. 73 – 74.
5. Вострокнутов Н.В. Устройство для непосредственного измерения времени опережения автоматического синхронизатора. АС СССР №127729 от 17. 07.1959, БП № 8, 1960.

Поступила 12.01.2004

*МАЛЫШ Александр Николаевич, адъюнкт ХВУ. В 2001 году окончил командно-штабной*

*факультет ХВУ. Область научных интересов – энергетическое обеспечение.*