

АНАНЬЕВ, В. Д. и др.
БЗ-13-9299.

С348.6

А-64



5016/2-75

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БЗ-13-9299

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19

75

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

В.Д.Ананьев, Б.Н.Бунин, Л.В.Едунов,

С.В.Зинкевич

БЗ-13-9299

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
ОСНОВНОГО ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО
ИМПУЛЬСОВ ИНЖЕКТОРА В БУСТЕРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ
РЕАКТОРА ИБР-2.

12 XI 75

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЕЛГОРОД

Дубна, 1975 г.

О г л а в л е н и е

	Стр.
Введение	1
I. Исследование фазовых колебаний машинной линии "двигатель - подвижный отражатель"	2
I. Программа проведения экспериментов	2
I.1. Цели и задачи испытаний	2
I.2. Организация измерений	3
I.3. Точность измерений	4
2. Анализ экспериментальных данных	4
2.1. Измерение периодов вращения элементов машинной линии ОПО и периода изменения напряжения электричес- кой сети	4
2.2. Измерение фазовых колебаний элементов машин- ной линии	5
2.3. Выводы из проведенных замеров	7
II. Совместная работа реактора и ускорителя при наличии фазовой нестабильности подвижного отражателя	7
I. Общие положения	8
2. Оценка максимальных флуктуаций энергии импульсов бустера вследствие фазовой нестабильности ОПО	11
3. Случай кратковременной полной фазовой рассинхрони- зации	12
4. О целесообразности автоматического регулирования энергии импульсов бустера	14
III. Выводы	15

Введение

Одним из основных режимов работы реактора ИБР-2 является так называемый бустерный режим. В этом режиме реактор работает как размножитель нейтронов, генерируемых в вольфрамовой мишени электронным импульсом ускорителя ИМУ-30. Чтобы обеспечить стабильную энергию нейтронного импульса, необходимо иметь, во-первых, стабильную амплитуду импульса электронов ускорителя и, во-вторых, точное совпадение по времени электронного импульса с моментом минимальной подкритичности реактора, когда подвижный отражатель находится в строго определенном положении относительно активной зоны.

Стабильность электронного импульса во многом определяется стабильностью источников питания. Так как стабилизация мощных источников питания достаточно сложна и дорога, проектом предусмотрено включение ускорителя при одном и том же фазовом угле переменного напряжения. Из этого решения вытекает необходимость синфазной работы реактора и ускорителя. При этом минимальная подкритичность реактора, соответствующая определенному положению ПО, должна достигаться при определенной фазе питающего напряжения. Такие условия работы потребовали применения синхронного двигателя для привода ПО и электромагнитной муфты, обеспечивающей возможность регулирования фазового сдвига. Однако существующая многоэлементная система передачи вращения от двигателя к ПО, не являясь механически жесткой, приводит к колебаниям фазы ПО относительно электрической сети, что может вызвать значительные

флуктуации энергии импульса.

В 1974 году на макете подвижного отражателя ИБР-2 были проведены исследования фазовых колебаний всех звеньев системы привода ПО. В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований и обсуждается влияние измеренных фазовых колебаний на стабильность энергии импульсов и безопасность работы реактора.

I. Исследование фазовых колебаний машинной линии "двигатель - подвижный отражатель"

I. Программа проведения экспериментов

I.1. Цели и задачи испытаний.

Как уже было сказано во введении, качество бустера (реактор с ускорителем) в значительной степени определяется возможностью постоянной синфазности подвижного отражателя и электрической сети. Так как предварительные измерения показали, что существует определенный разброс между моментом времени, когда подвижный отражатель приходит в рабочее положение и фазой электрического напряжения, в которой включается ускоритель, задачами экспериментальных исследований явилось:

I) Определение максимальных фазовых колебаний лопасти ОПО от оборота к обороту и медленных фазовых уходов;

2) Изучение влияния различных узлов машинной линии (двигатель - отражатель) на результирующие фазовые колебания.

1.2. Организация измерений.

Машинная линия была разбита на отдельные элементы (рис. 1), между которыми измерялись относительные фазовые колебания и периоды вращения. Измерения проводились с помощью емкостных датчиков (рис. 2). На валах двигателя и электромагнитной муфты были закреплены вспомогательные пластинки, проходящие при вращении под измерительными электродами датчиков. Сигналы ("управляющие импульсы") формировались фронтом импульса, соответствующего прохождения пластинки под датчиком. При измерении фазы основного подвижного отражателя **запускающий** сигнал формировался в момент прохождения края лопасти ОПО мимо соответствующего емкостного датчика.

Чтобы избежать ошибок измерений, были проведены контрольные замеры для определения стабильности частоты сети. В ходе этих замеров управляющие импульсы формировались при переходе через нуль электрического напряжения ("нулевая фаза"). Рис. 3 и 4 иллюстрируют методику измерений. Управляющие импульсы "i" включают электромеханический частотомер, который регистрирует количество импульсов внутреннего кварцевого генератора до прихода "i + 1" -го управляющего импульса. Для измерения фазового сдвига между различными элементами машинной линии частотомер запускается управляющим сигналом, связанным с "опережающим" элементом, а выключается сигналом от "запаздывающего" элемента.

1.3. Точность измерений.

Точность измерений определяется:

а) точностью частотомера, которая, согласно паспортным данным, не хуже ± 1 мксек,

б) точностью фиксации во времени управляющих сигналов.

На специальном стенде были проведены контрольные измерения, которые показали, что общая временная нестабильность схем измерения не ниже ± 3 мксек. Так как первые же измерения показали, что реальные фазовые колебания намного превышают указанные значения, каких-либо работ для повышения точности измерений не проводилось.

На рисунках 5 + II представлены результаты измерений. В таблицах I + 2 указаны "быстрые" и "медленные" колебания измеряемых величин. "Быстрые" колебания - изменения величины фазового сдвига между двумя последовательными оборотами рассматриваемых элементов машинной линии ПО. "Медленные" колебания - разброс величины фазового сдвига за время всего замера.

2. Анализ экспериментальных данных

2.1. Измерение периодов вращения элементов машинной линии ОПО и периода изменения напряжения электрической сети.

а) Период (частота) сети меняется в относительно небольших пределах и не является причиной, определяющей изменение периода вращения элементов машинной линии (рис. 5, замеры А.1.1 и А.1.2.).

б) Периоды вращения вала двигателя и вала муфты изменяются в несколько раз сильнее, чем период сети (рис. 6, замеры А.2.1 и А.3.1), однако собственно подвижный отражатель вращается с меньшими колебаниями периода (рис. 7, замеры А.4.1. и А.4.2).

Можно, очевидно, считать, что из-за большой массы ОПО является своеобразным демпфером, слабо реагирующим на биение шестерен, технологические лифты, быстрое изменение частоты сети и т.д.

в) Если колебания периодов сети, вала двигателя и вала муфты носят хаотический характер, то в колебаниях подвижного отражателя можно выделить две основные гармоники с частотой порядка 13 гц и 0,25 гц (рис. 7). Здесь более высокая гармоника (13 гц), очевидно, обусловлена крутильными колебаниями ротора ОПО, а 0,25 гц определяется скоростью реакции ротора на флуктуации частоты электрического напряжения, биение шестерен и выбор лифтов.

2.2. Измерение фазовых колебаний элементов машинной линии.

а) Измерение фазовых колебаний вращающихся элементов относительно электрической сети.

Измерения фазовых колебаний вала электродвигателя проводились в двух режимах: режиме холостого хода (муфта обесточена, нагрузки на двигатель нет) и в рабочем режиме (т.е. при вращающемся отражателе, муфта включена). Результаты замеров приведены на рис. 8. Из графиков видно резкое различие фазовых колебаний в этих режимах. Очевидно, что колебания при нагруженной муфте

более значительны, т.к. на них оказывают влияние возмущения, вызываемые всей трансмиссионной линией и собственными колебаниями отражателя.

Результаты измерений фазовых колебаний вала муфты (рис.9) аналогичны таковым для вала двигателя.

Для исследования фазовых колебаний отражателя относительно сети было произведено три замера (рис. 10). Измерения продемонстрировали значительные фазовые колебания, при этом быстрые изменения фазы достигают $4,7^\circ$ ($\pm 2,4^\circ$), а медленные $\sim 7,5^\circ$ ($\pm 3,8^\circ$). Процесс фазовых колебаний носит ярко выраженный периодический характер. Можно выделить две гармоники с частотой 12,5 гц и 0,8 гц. Учитывая незначительность колебаний периода сети (А.1.1, рис. 5), можно было бы предположить, что проведенные замеры должны соответствовать измерениям Б.3.1 + Б.3.3 (рис.10). Однако изменилась и частота одной из гармоник (вместо 0,25 гц - 0,8 гц), и абсолютные значения фазовых колебаний. По-видимому, условия вращения ОЮ при этих измерениях несколько изменились.

б) Фазовые колебания между валом двигателя и подвижным отражателем.

Из рис. II (график В.1.1) видно, что изменение этих фазовых сдвигов довольно хаотично, и трудно выделить какие-либо закономерности.

в) Фазовые колебания между валом муфты и подвижным отражателем. В среднем быстрые изменения фазовых сдвигов в приведенном замере (рис. II, график В.1.2) несколько меньше, не наблюдаются

резкие скачки фазы, достигающие $\sim 2,3^\circ$. Возможно, что этот эффект связан с биением шестерен мультипликатора, находящегося непосредственно между валом муфты и трансмиссионным валом ОЮ.

2.3. Выводы из проведенных замеров.

а) Наблюдаемые фазовые колебания, как правило, значительно превышают точность измерений (± 4 мсек, или $\pm 7,2 \cdot 10^{-2}$ угловых градусов)

б) Даже при ненагруженном двигателе существуют определенные флуктуации периода и фазы. Однако по абсолютной величине эти колебания не превышают 1° .)

в) Наблюдаемые максимальные значения колебаний фазы ОЮ относительно сети не превышают $3,8^\circ$.

г) При исследовании одних и тех же элементов результаты измерений от замера к замеру несколько изменяются. Можно предположить, что отражатель реагирует на изменение условий работы (концентрация и температура гелия, температура масла и т.д.)

д) Т.к. трансмиссионная линия рабочего подвижного отражателя несколько отличается от машинной линии макета, необходимо провести аналогичные измерения при сбкате штатного ПО.

II. Совместная работа реактора и ускорителя при наличии фазовой нестабильности подвижного отражателя

Полученные результаты позволяют рассмотреть вопрос о стабильности энергии импульса реактора и возможности безопасной работы в бустерном режиме.

I. Общие положения

Как известно $|I|$, энергия импульсов реактора при его работе в бустерном режиме определяется формулой:

$$E = \frac{S_0 t_1}{\nu |\epsilon|}, \quad (1)$$

где S_0 - интенсивность источника нейтронов,

t_1 - длительность электронной вспышки ускорителя,

ν - число вторичных нейтронов на акт деления,

ϵ - величина импульсной подкритичности,

Реактивность ϵ определяется формулой:

$$\epsilon = \epsilon_m - \alpha_\tau \tau^2, \quad (2)$$

где ϵ_m - минимальная подкритичность,

α_τ - коэффициент параболы,

τ - отрезок времени от момента достижения максимума реактивности до момента появления импульса ускорителя.

В разные моменты времени t , соответствующие последовательности импульсов бустера, величина τ принимает различные значения, т.е. $\tau = f(t)$.

Угловой фазовый сдвиг φ пропорционален временному фазовому сдвигу τ :

$$\varphi = \sqrt{\frac{\alpha_\tau}{\alpha_\varphi}} \tau.$$

Поэтому формулу (2) можно переписать в виде:

$$\epsilon(\varphi) = \epsilon_m - \alpha_\varphi \varphi^2.$$

Интенсивность внешнего источника S_0 (см. формулу (1)) зависит только от характеристик ускорителя и мишени $1/l$:

$$S_0 = \frac{10^{19}}{1,6} J K_{ЭН} \omega, \quad (3)$$

где J - максимальный ток ускорителя,

$K_{ЭН}$ - коэффициент конверсии электронов в нейтроны,

ω - отношение ценности нейтронов мишени к средней ценности нейтронов деления в активной зоне.

Поскольку $K_{ЭН}$ и ω - постоянные величины, то, приняв в выражении (3) $J = const$, формулу (1) можно записать в виде:

$$E = \frac{A}{|\varepsilon(\varphi)|}, \quad (4)$$

где $A = const$.

В идеальном случае, когда развитие импульса ЛМУ-30 совпадает с максимумом реактивности, известной ОЮ ($\varphi = 0$), энергия импульса будет максимальной:

$$E_0 = \frac{A}{|\varepsilon_m|}.$$

В случае рассинхронизации ОЮ относительно электрической сети ($\varphi_i \neq 0$) реактивность $\varepsilon(\varphi)$ будет уменьшаться, что соответствует увеличению подкритичности и снижению энергии импульса. Вследствие остывания реактора появится положительный температурный эффект. В итоге энергия каждого импульса бустера запишется в общем виде таким образом:

$$E_i = \frac{A}{|\varepsilon_m - \alpha_\varphi \varphi_i^2 + \frac{dK_i}{dT} (T_i - T_0)|}, \quad (5)$$

где T_0 - температура топлива, соответствующая энергии E_0 ,

T_i - температура топлива перед i -м импульсом, $T_i \leq T_0$,

$\frac{dk}{dT}$ - температурный коэффициент реактивности, $\frac{dk}{dT} < 0$.

Из формулы (5) видно, что при остывании реактора, обусловленном рассинхронизацией ОПО, будет происходить накопление температурного вклада в реактивность. Если через некоторое время импульс инжектора совпадет по времени с максимумом реактивности ($d\varphi^2 = 0$), то энергия увеличится по сравнению с номинальным значением E_0 и будет равна ж)

$$E_i = \frac{A}{|\epsilon_m + \frac{dk}{dT} (T_i - T_0)|} \quad (6)$$

Поскольку температурный коэффициент реактивности практически постоянен, увеличение энергии импульса будет определяться температурой T_i , до которой успел остыть реактор. При небольших (или кратковременных) фазовых рассогласованиях температура изменится мало. Вследствие этого, а также из-за малости величины $\frac{dk}{dT} \sim -10^{-5}$, температурный вклад будет незначительным.

Поэтому ограничимся рассмотрением случая полной фазовой рассинхронизации и выясним, на какое время она является допустимой.

ж) $E_i > E_0$, т.к. величины, стоящие под знаком модуля в знаменателе формулы (6), имеют разный знак.

2. Оценка максимальных флуктуаций энергии импульсов бустера вследствие фазовой неустойчивости ОПО

Как показали измерения, максимальные фазовые колебания ОПО относительно сети (т.е. относительно момента развития электронного импульса инжектора) φ_{max} составляют $\sim \pm 3,8^\circ$. Исходя из этого, можно определить флуктуации энергии импульсов бустера:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E(\varphi_{max})}{E_0} &= \frac{E - E(\varphi_{max})}{E_0} = \frac{\frac{A}{|\epsilon_m|} - \frac{A}{|\epsilon_m - \alpha_\varphi \varphi_{max}^2|}}{\frac{A}{|\epsilon_m|}} = \\ &= \frac{|\epsilon_m - \alpha_\varphi \varphi_{max}^2| - |\epsilon_m|}{|\epsilon_m - \alpha_\varphi \varphi_{max}^2|}. \end{aligned} \quad (7)$$

Принимаем значение максимума реактивности $\epsilon_m = -5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует средней мощности бустера $\sim 0,75$ Мвт и полуширине импульса ~ 5 мксек. Тогда, учитывая, что $\alpha_\varphi = 3,8^\circ 10^{-4}$ град⁻², получим:

$$\frac{\Delta E(\varphi_{max})}{E_0} \approx 0,52.$$

Средние флуктуации энергии импульсов бустера можно получить аналогичным образом, подставив в формулу (7) вместо значения $\varphi_{max} = \pm 3,8^\circ$ значение $\varphi_{cp} = \pm 0,9^\circ$ (см. табл. 2). В этом случае

$$\frac{\Delta E(\varphi_{cp})}{E_0} \approx 0,06.$$

3. Случай кратковременной полной фазовой рассинхронизации

Наихудшие условия работы бустера с точки зрения ядерной безопасности реализуются при полной фазовой рассинхронизации и последующей резкой синхронизации ускорителя и подвижного отражателя. Этот эффект аналогичен кратковременному отключению ускорителя и последующему мгновенному включению его в рабочей фазе ОЮ.

После пропадания электронных импульсов инжектора реактор начнет остывать по закону, близкому к экспоненциальному:

$$T = T_0 \cdot e^{-at}, \quad (8)$$

где T_0 - температура топлива, соответствующая синхронной работе ОЮ и инжектора.

Время t в формуле (8) можно выразить через число "пропавших" импульсов ускорителя n :

$$t = t_u \cdot n,$$

где t_u - период следования импульсов, $t_u = 0,02$ сек.

Максимальное расчетное значение коэффициента a , соответствующее снижению средней температуры центральных твэлов активной зоны при средней мощности реактора 4 Мвт, составляет 0,1.

Допустим, что через некоторое время, после того, как инжектор включился вновь, электронный импульс совпал с максимумом реактивности реактора. Тогда энергия аварийного импульса

бустера E_a , с учетом вышесказанного, будет равна.

$$E_a = \frac{A}{|\epsilon_m| + \frac{dk}{dT} T_0 (1 - e^{-at})} = \frac{A}{|\epsilon_m| + \frac{dk}{dT} T_0 (1 - e^{-at_u n})}$$

Рассчитаем допустимое время отключения ускорителя, исходя из положения, что энергия импульсов бустера E_a не должна превышать значения 0,2 Мдж, что соответствует средней мощности $\overline{W} = 10$ Мвт.

Поскольку $E = f(\epsilon_m)$, можно записать:

$$\frac{E_a}{E_0} = \frac{\frac{A}{|\epsilon_m| + T_0 \frac{dk}{dT} (1 - e^{-at_u n})}}{\frac{A}{|\epsilon_m|}} = \frac{|\epsilon_m|}{|\epsilon_m| + T_0 \frac{dk}{dT} (1 - e^{-at_u n})} \leq \beta,$$

где $\beta = f(\epsilon_m)$ - отношение предельно допустимой мощности к номинальной. Отсюда легко определить допустимое число "пропавших" импульсов инжектора $n_{дон}$ в функции максимальной параболлической реактивности ϵ_m и коэффициента β (значение коэффициента a при этом полагаем для простоты постоянным, $a = 0,1$):

$$n_{дон} = 500 \ln \frac{1}{1 + \frac{|\epsilon_m|}{T_0 \frac{dk}{dT}} \cdot \frac{\beta - 1}{\beta}} \quad (9)$$

Величины $n_{дон}$ и соответствующие им значения времени $t_{дон} = t_u \cdot n_{дон}$, рассчитанные для различных значений средней мощности бустера \overline{W} , в зависимости от умножения $|\epsilon_m|^{-1}$,

сведены в таблицу 3. Значения максимальной температуры твэла T_0 соответствуют заданной средней мощности.

Из приведенных в табл. 3 расчетных данных следует, что при реальных значениях $|\epsilon_m|^{-1} \leq 200$ аварийная ситуация даже в рассмотренном гипотетическом случае практически невозможна.

4. О целесообразности автоматического регулирования энергии импульсов бустера

Предположим, что в бустерном режиме работы реактора ИБР-2 используется достаточно быстродействующая система автоматического регулирования. Рассмотрим возможность применения такой системы для выравнивания энергии импульсов бустера.

Допустим, исходная энергия импульса равна номинальному значению:

$$E^{(1)} = \frac{A}{|\epsilon_m|},$$

а за последующий оборот лопасть ОЮ рассогласовалась относительно электронного импульса инжектора на угол φ . Энергия импульса уменьшится:

$$E^{(2)} = \frac{A}{|\epsilon_m - \alpha \varphi^2|}. \quad (10)$$

Учитывая знаки $\epsilon_m < 0$ и $\alpha \varphi^2 > 0$, перепишем (10) в виде:

$$E^{(2)} = \frac{A}{|\epsilon_m| + \alpha \varphi^2}.$$

Система автоматического регулирования, чтобы вывести энергию следующего импульса на новый уровень, "введет" в знаменатель формулы (10) отрицательную добавку к реактивности:

$$\epsilon_{\varphi} = -\alpha \varphi^2$$

В этом случае энергия импульса бустера была бы равна следующему значению:

$$E^* = \frac{A}{|\epsilon_m| + \alpha \varphi^2 + \epsilon_{\varphi}} = \frac{A}{|\epsilon_m|}$$

Предположим, что после этого ОПО, сместившись в обратную сторону, совпал по фазе с импульсом инжектора.

Тогда

$$E^{(3)} = \frac{A}{|\epsilon_m| + \epsilon_{\varphi}} = \frac{A}{|\epsilon_m| - \alpha \varphi^2} \quad (II)$$

Отсюда следует, что при умножениях $|\epsilon_m|^{-1} = 500$ и выше знаменатель формулы (II) при больших фазовых рассогласованиях может приблизиться к нулю, что, соответственно, приведет к значительному увеличению мощности бустера.

III. Выводы

Анализ проведенных расчетов и измерений позволяет констатировать следующее:

I. Работа реактора в бустерном режиме при любых фазовых рассогласованиях и реальных значениях реактивности не приводит к аварийной ситуации. Т.к. "качество" бустера удовлетворяет

экспериментаторов только при значениях $|\epsilon_m|^{-1} \leq 200$, даже медленная защита от пропадания импульсов инжектора обеспечит безопасность работы.


2. При работе реактора в бустерном режиме автоматическое регулирование нецелесообразно.

3. Фазовые колебания ОПО относительно сети довольно велики и достигают $3,8^\circ$, что соответствует изменению мощности по сравнению с номинальной примерно на 50%.

4. Колебания фазы ОПО имеют периодический характер с двумя основными гармониками: быстрых (12,5 гц) и медленных ($\sim 0,8$ гц) изменений величины фазового сдвига.

5. Значительные составляющие флуктуаций фазы ОПО относительно сети появляются в узлах мультипликатора и вала двигателя. Это следует учесть при доводке штатной машины.

В заключение авторы приносят свою благодарность Е.П.Шабалину, В.Л.Ломидзе и Р.В.Ларьзову за участие в обсуждении результатов проведенной работы, а также В.Н.Лукову и Н.А.Шилину за четкое и грамотное обслуживание экспериментов.



Л и т е р а т у р а

1. Б.Н.Бунин, В.М.Левин, С.К.Николаев и др. "Пуск реактора ИБР-30 в режиме импульсного бустера" (Сообщение ОИЯИ; I3-62I3, 1972 г.)
2. В.Д.Ананьев и др. "Особенности конструкции и оптимизация модулятора реактивности реактора ИБР-2", (АЭ, 1971 г., т. 31, вып. 4, стр. 352).
3. В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев, Н.В.Букаев и др. "Импульсный реактор с инжектором ИБР-2", (Сообщение ОИЯИ, I3-4392, 1969 г.)
4. Б.Н.Бунин, И.М.Матора, С.К.Николаев и др. "Опыт эксплуатации реактора ИБР, его применение для нейтронных исследований и его характеристики при инжекции нейтронов от микрофона". (Доклад на III-ей Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях.). Женева, 1964.

Флуктуации периодов вращения элементов машинной
линии ПО и периода изменения напряжения в электрической сети

№ пп	Наименование исследуемого элемента	№ за- мера	Изменение величины периода					
			Максимальные медленные		Максимальные быстрые		Средние быстрые	
			мксек	град	мксек	град	мксек	град
1.	Электрическая сеть	A.1.1 A.1.2	47 36	0,85 0,65	30 13	0,54 0,23	10 4	0,18 0,07
2.	Вал двигателя	A.2.1	176	3,20	90	1,60	20	0,36
3.	Вал муфты	A.3.1	184	3,30	140	2,50	30	0,54
4.	ОПО	A.4.1	110	2,00	70	1,30	15	0,27
		A.4.2	36	0,65	12	0,21	4	0,07

Изменение величины фазового сдвига между
вращающимися элементами Ю и "нулем" электрической сети

№ пп	Пара элементов, между которыми замеряется фазовый сдвиг	Д за- мера	Изменение величины фазового сдвига					
			Максимальные меньшие		Максимальные большие		Средние	
			мсек	град	мсек	град	мсек	град
1.	Вал двигателя - сеть	B.1.1	115	2,1(+ 1,1°)	62	1,1(+ 0,6°)	10	0,18(+ 0,09)
		B.1.2	258	4,6(+ 2,3°)	216	3,9(+ 2,0°)	40	0,72(+ 0,36)
2.	Вал муфты - сеть	B.2.1	260	4,7(+ 2,4°)	160	2,9(+ 1,5°)	50	0,90(+ 0,45)
3.	ОЮ - сеть	B.3.1	420	7,6(+ 3,8°)	260	4,7(+ 2,4°)	110	1,80(+ 0,90)
		B.3.2	220	4,0(+ 2,0°)	160	2,9(+ 3,0°)	50	0,90(+ 0,45)
		B.3.3	330	5,9(+ 3,0°)	260	4,7(+ 2,4°)	70	1,30(+ 0,65)
4.	Вал двигателя - ОЮ	B.1.1	128	2,3(+ 1,2°)	116	2,1(+ 1,1°)	40	0,72(+ 0,36)
5.	Вал муфты - ОЮ	B.2.1	156	2,8(+ 1,4°)	118	2,1(+ 1,1°)	20	0,36(+ 0,18)

Таблица 3

M_0^n/n	$ e_m ^{-1}$	\overline{W} [МВт]	T_0 [°C]	θ	n_{gon}	t_{gon} [сек.]
1	10	0,038	310	267,0	∞	∞
2	100	0,375	400	26,7	∞	∞
3	200	0,750	500	13,3	915	18,3
4	500	1,875	790	5,3	95	1,9
5	1000	3,750	1280	2,7	25	0,5

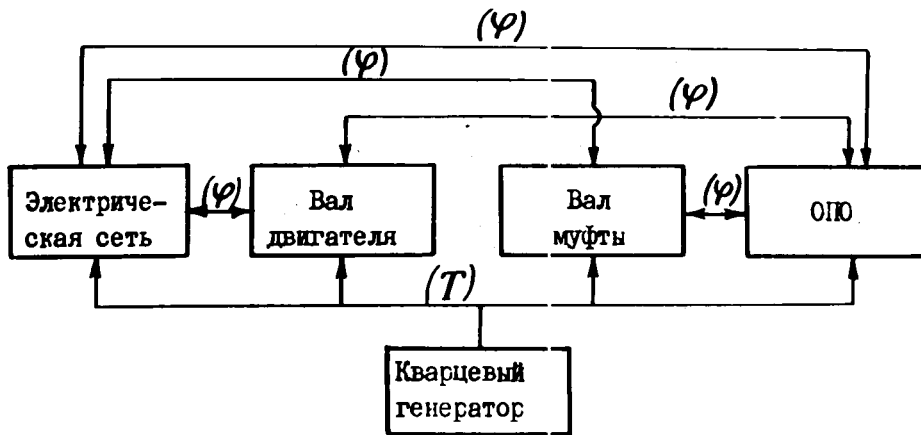
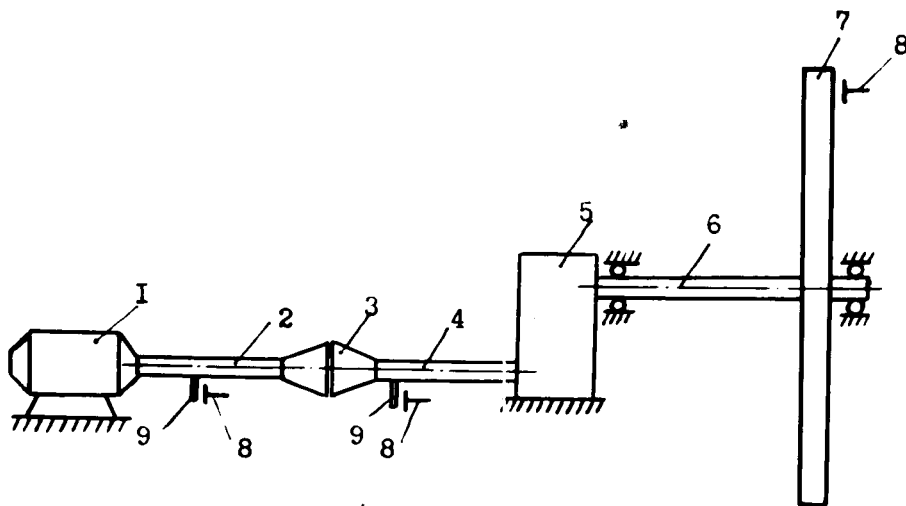


Рис.1. Блок-схема взаимного расположения объектов измерения.



Условные обозначения: 1 - электродвигатель, 2 - вал двигателя, 3 - электро-магнитная муфта, 4 - вал муфты, 5 - мультипликатор, 6 - вал ОЮ, 7 - ОЮ, 8 - емкостный датчик, 9 - вспомогательная пластинка.

Рис. 2. Схема размещения емкостных датчиков относительно объектов измерения.

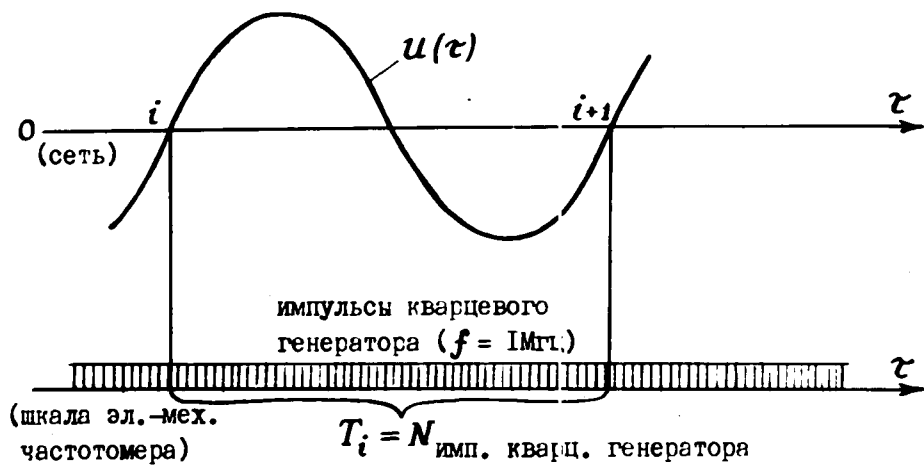


Рис.3,а). Принцип измерения величины периода электрической сети.

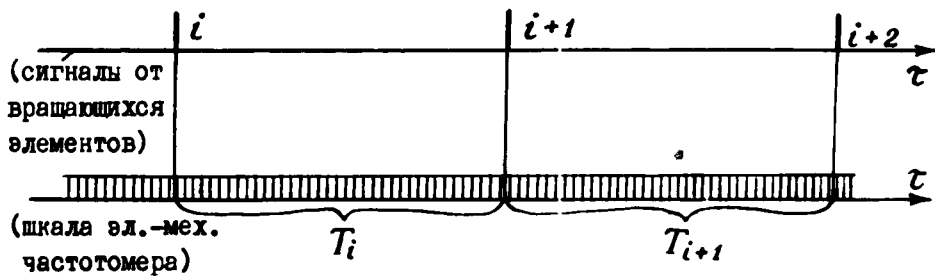


Рис.3,б). Измерение периода вращения элементов ПО.

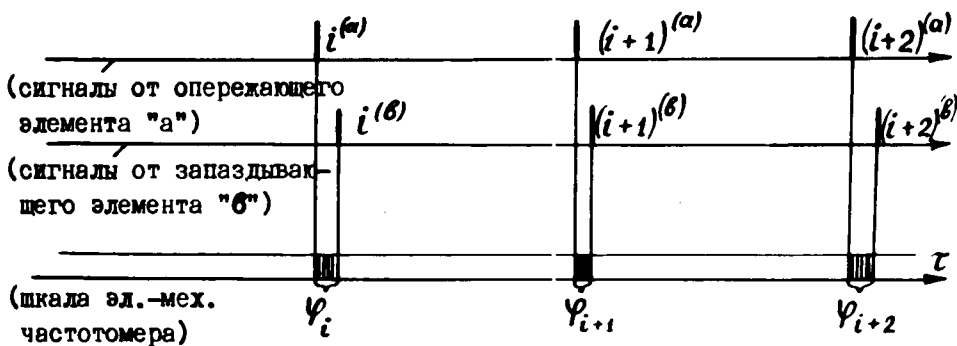
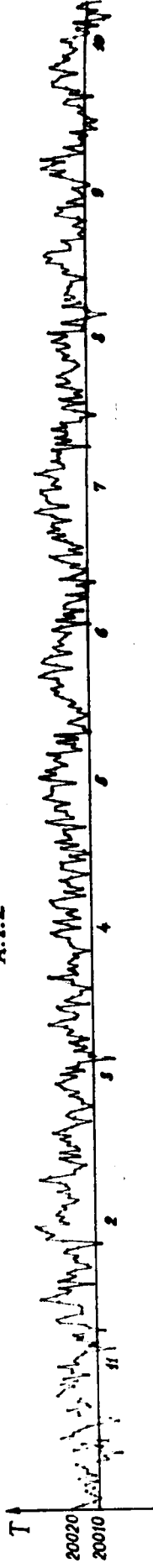


Рис.4. Принцип измерения величины фазового сдвига между элементами "а" и "б".

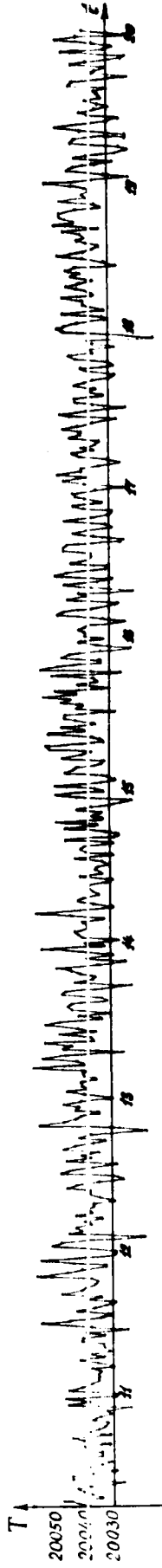
A.1.1



A.1.2



A.1.1 (продолжение).



A.1.2 (продолжение).

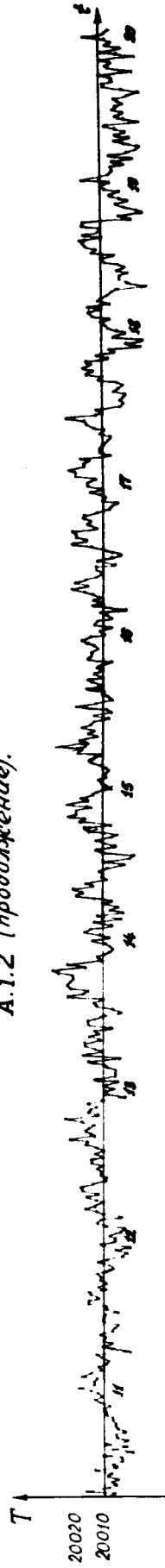


Рис. 5. Временная зависимость периода колебаний напряжения в электрической сети.
 T - μ сек., t - μ сек.

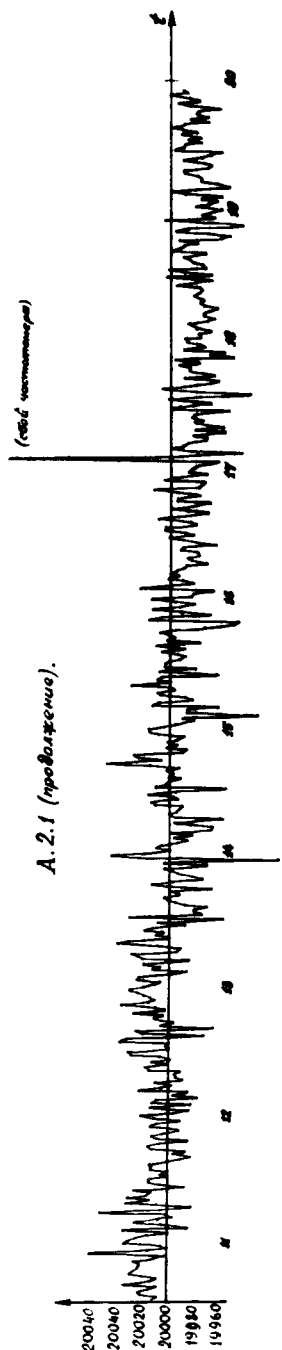
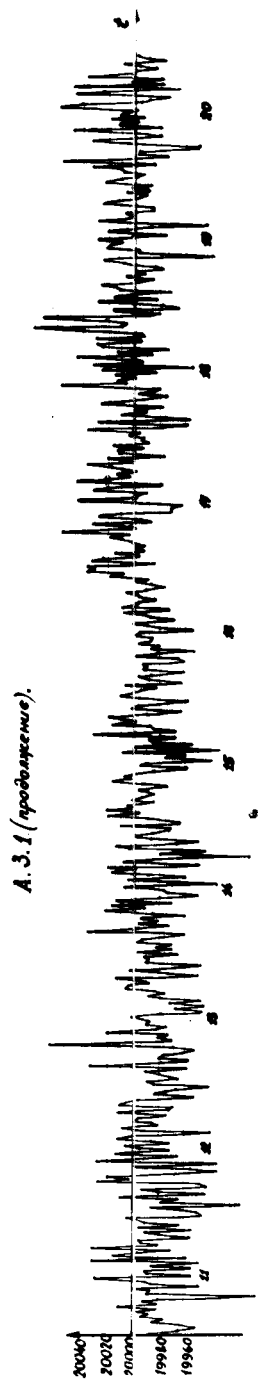
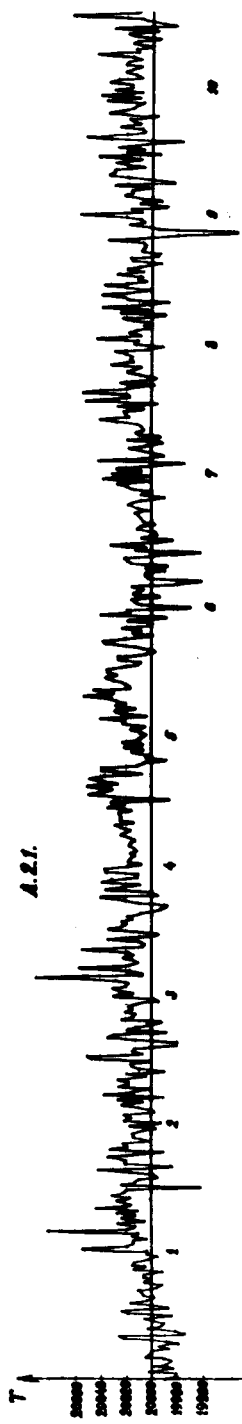
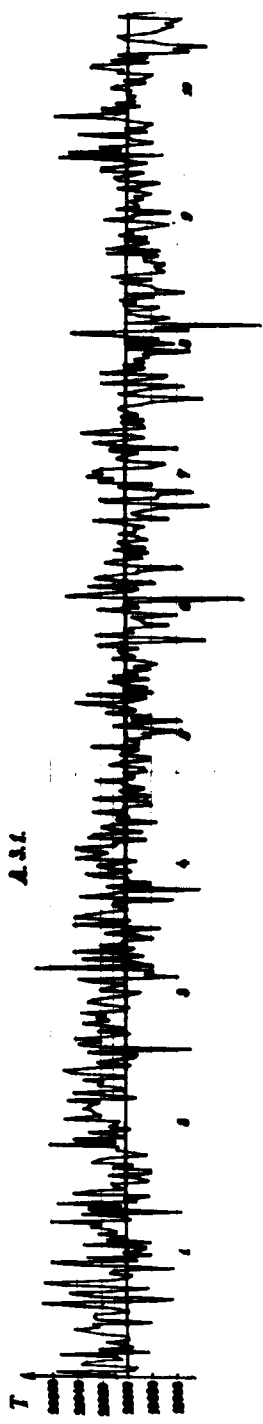
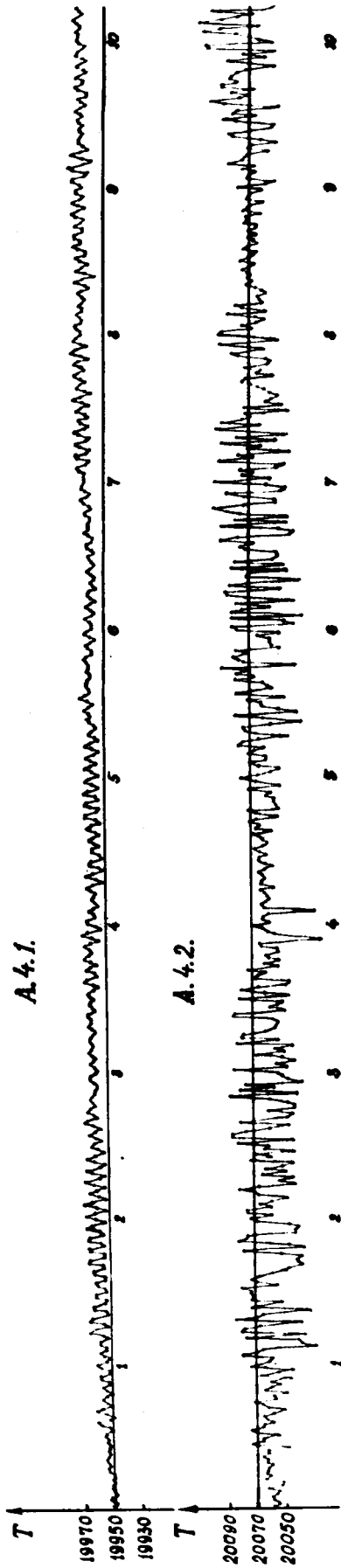


Рис. 6. Изменение во времени периодов брашения валов двигателя (А.2.1) и муфты (А.3.1).
 T - t [мсек], t - t [сек].



А. 4.1 (продолжение).

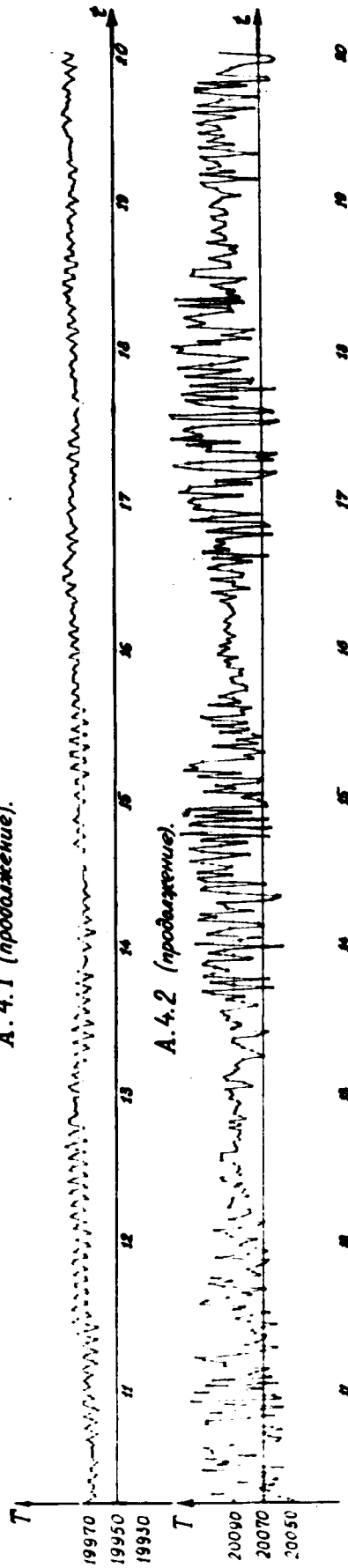
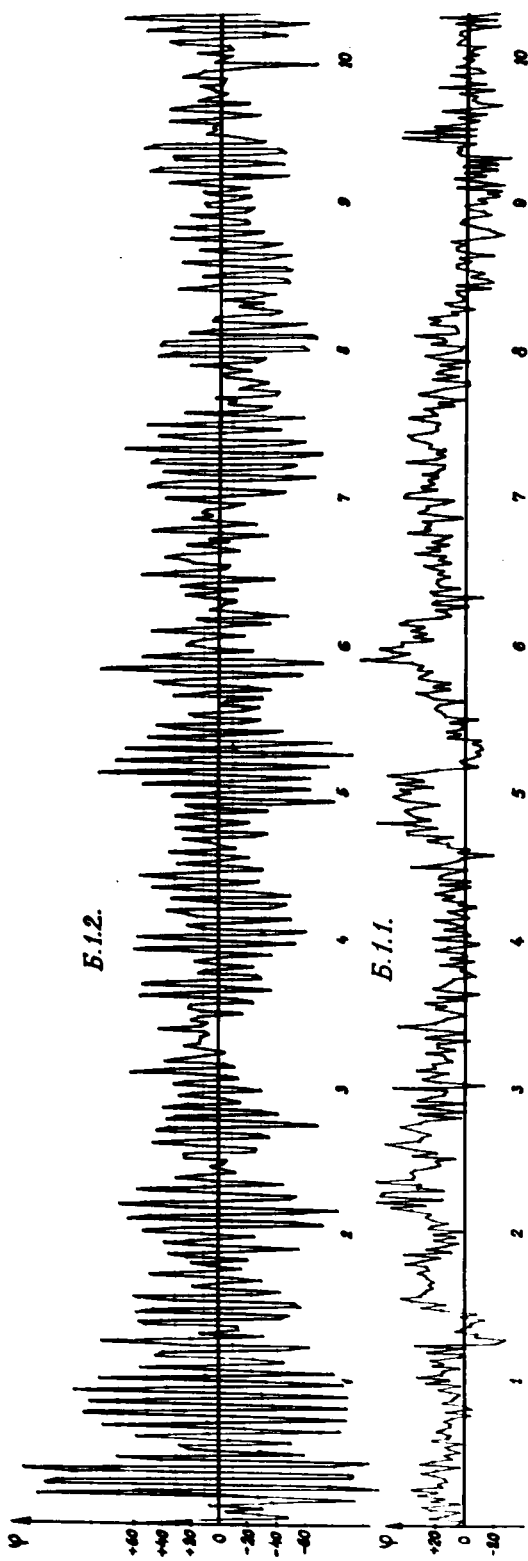
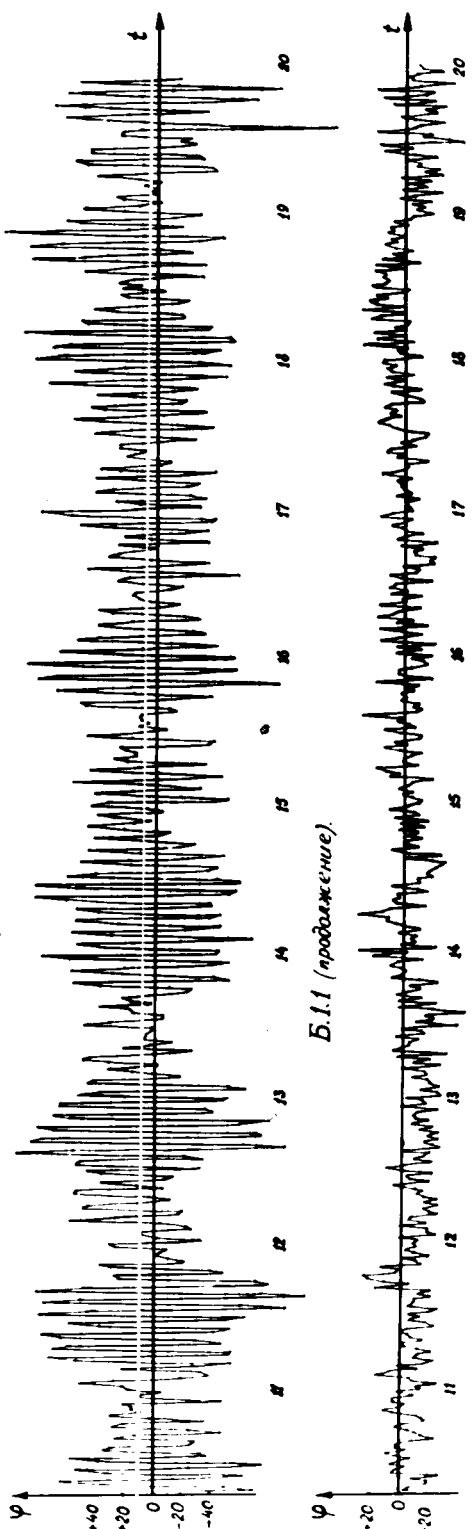


Рис. 7. Изменение во времени периода вращения ОЛО. Т-6 [сек], t-6 [сек].



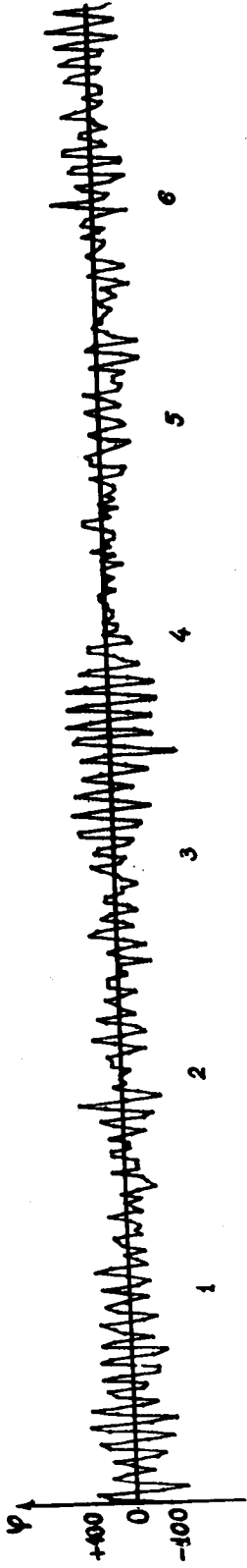
Б.1.2 (продолжение).



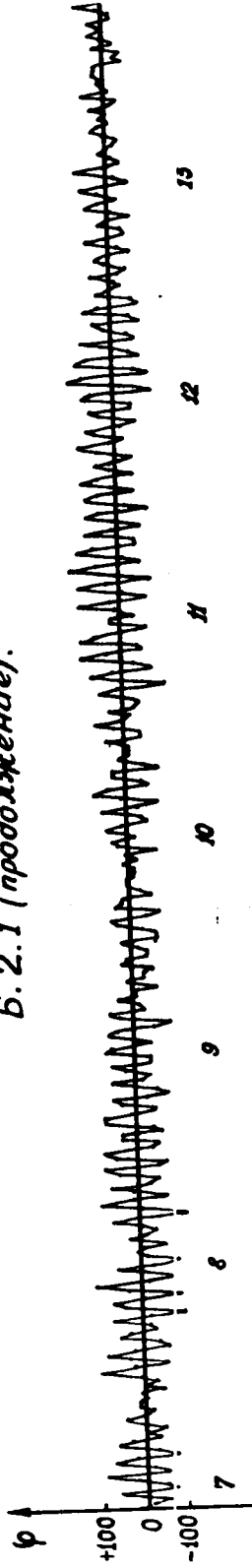
Б.1.1 (продолжение).

Рис. 8. Изменения во времени величин фазового сдвига между выходами двигателей и «нулем» электрической сети в рабочем режиме (Б.1.2) и режиме холостого хода. φ - в (миллисек), t - в (сек.).

Б. 2. 1.



Б. 2. 1 (продолжение).



Б. 2. 1 (продолжение).

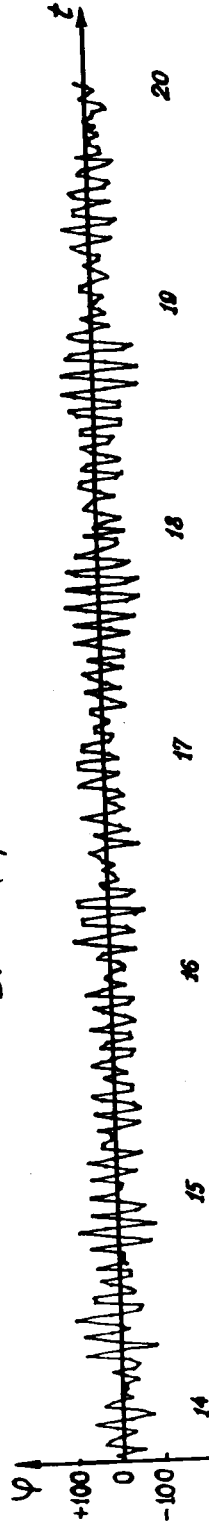


Рис. 9. Изменение во времени величины фазового сдвига φ между валом муфты и «нулем» сети. φ - в [мксек.], t - в [сек.].

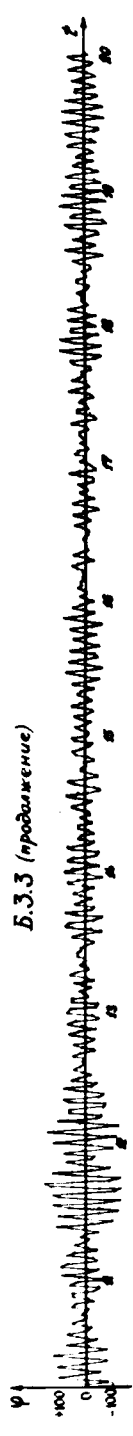
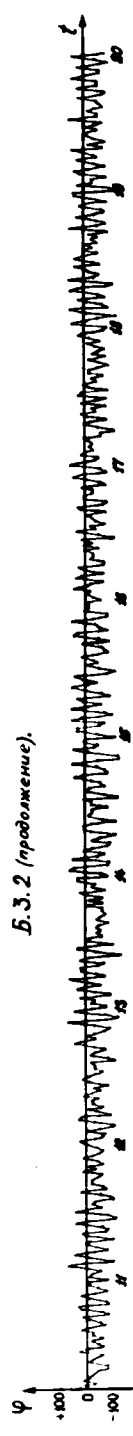
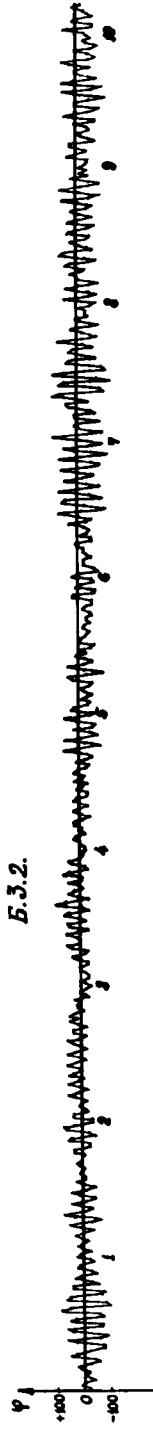
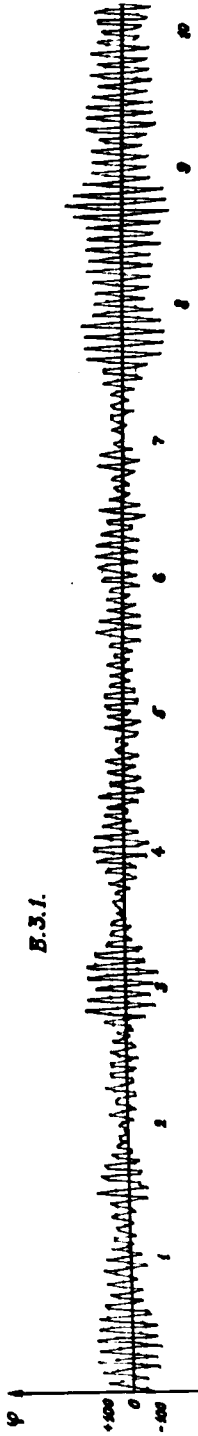
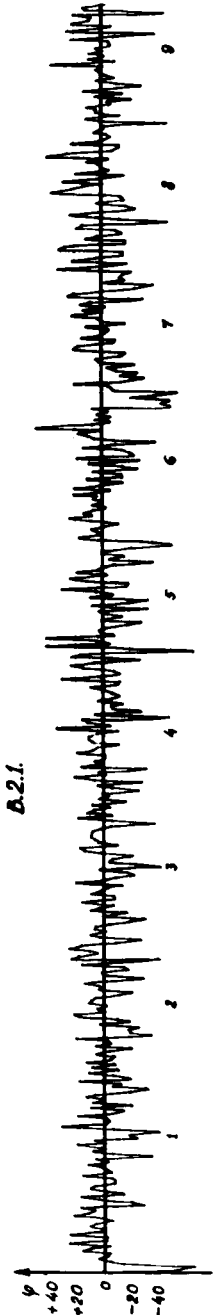


Рис. 10. Графики изменения величины фазового сдвига ψ между ОПО и "нуле́й" сети во времени t .
 t - в [сек], ψ - в [милсек]



B.1.1 (продолжение)



B.2.1 (продолжение)

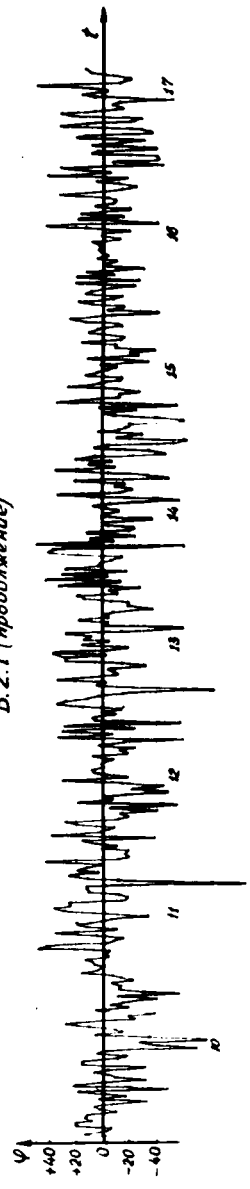


Рис. 11. Изменение во времени величин фазового сдвига ψ между ОПО и балом двигателя (B.1.1) и между ОПО и балом муфта (B.2.1). ψ - в [мксек], t - в [сек].