



Влияние функции распределения активной мощности на эффективность ГЭС

В.Е. Захарченко, А.А. Сидоров (ООО НВФ "Сенсоры. Модули. Системы")

Поднимаются проблемы повышения КПД гидроэлектростанций за счет изменения функции распределения активной мощности систем группового управления гидроэлектростанций. Предлагаются различные варианты реализации распределения мощности, иллюстрируемые примерами, в результате сравнения выявляются их достоинства и недостатки. Полученные результаты могут быть обобщены для ГЭС с произвольным числом агрегатов и их типом.

Ключевые слова: функция распределения мощности, КПД, ГЭС, гидроагрегат, САУ, эффективное управление, потенциальные потери.

Известно, что КПД гидроагрегатов и, следовательно, ГЭС зависит от напора и активной мощности агрегатов в данный момент времени [1, 2, 3]. Активная мощность ГЭС в каждый момент определяется заданием системного оператора, учитывающим множество факторов: электрическую частоту, водный режим, перетоки и многое другое. На гидростанциях уже давно применяются системы группового регулирования активной мощностью агрегатов. Их основная задача — распределить общее задание на ГЭС по конкретным агрегатам станции и проконтролировать выполнение частных и общего заданий. Организационная структура схематично представлена на рисунке (рис. 1).

Одним из направлений повышения эффективности ГЭС является система рационального управления составом агрегатов (РУСА) [4, 5], которая рекомендует изменения состава оборудования: отключать менее эффективные и использовать наиболее эффективные агрегаты. Альтернативой является оптимизация функции распределения мощности системы группового регулирования ГЭС, которая формируя задание на агрегат, фактически определяет его эффективность и эффективность ГЭС в целом. При этом повышение эффективности может быть достигнуто на действующем оборудовании и не требует изменения состава агрегатов, что чрезвычайно важно, поскольку каждое изменение состава — это расходование ресурса. Следовательно, необходимо исследовать, какие функции распределения активной мощности можно было бы предложить для:

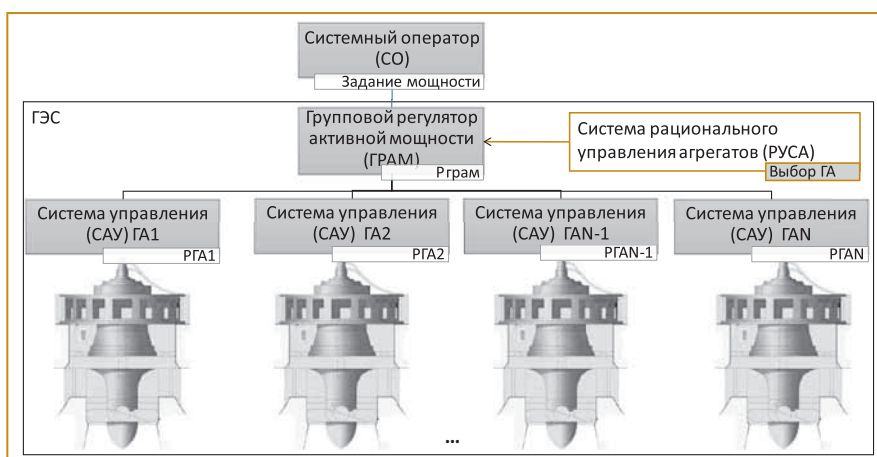


Рис. 1. Организационная структура распределения активной мощности ГЭС

Таблица 1. Основные параметры ГА1,2,3

	ГА1	ГА2	ГА3	ГЭС
Нижнее огр. P_{min}	0	10	20	30
Верхнее огр. P_{max}	80	90	100	270
ЭХ	КПД			
	Р	86	86	86

- 1) увеличения КПД ГЭС;
- 2) применения с агрегатами различных эксплуатационных характеристик;
- 3) максимизации скорости отработки задания ГЭС от системного оператора.

Проблемы группового управления связаны с тем, что на ГЭС практически не существует одинаковых агрегатов. Иногда на одной ГЭС встречаются агрегаты разных производителей, агрегаты работают на разных номинальных мощностях, но даже одинаковые эксплуатационные характеристики агрегатов одного производителя со временем становятся разными из-за индивидуальностей установки, режимов работы, из-за нагрузок и т.д. В силу этих же причин у агрегатов могут со временем сформироваться различные ограничения по режимам работы. В этой связи одинаковое задание на гидроагрегаты может по-разному сказываться на их КПД и на КПД ГЭС.

В группе компаний "СМС Автоматизация" было проведено исследование различных функций распре-

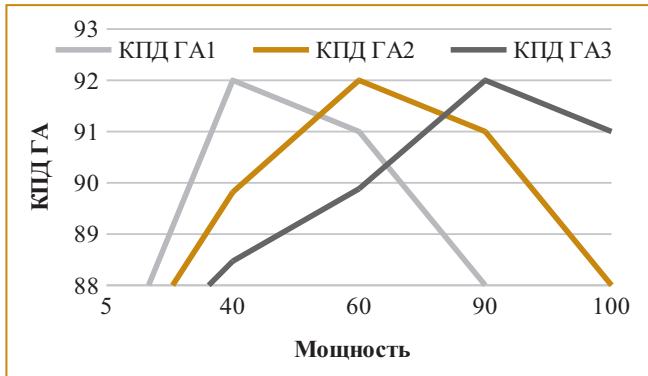


Рис. 2. КПД ГА1,2,3 при фиксированном напоре

деления активной мощности, выполнено сравнение, и результат кратко представлен в этой работе.

Рассмотрим подробнее четыре варианта распределения:

- равенство мощностей;
- равенство долей диапазонов;
- равенство отклонений от максимального КПД;
- равенство долей диапазонов на загрузку/разгрузку.

Для каждой функции распределения опишем общую формулу для N агрегатов, находящихся в групповом режиме регулирования, с одной зоной разрешенной работы с ограничениями $P_{min_{ГАi}}, P_{max_{ГАi}}, i = 1, N$.

Каждый вариант распределения мощности проиллюстрируем на примере некоторой ГЭС из трех агрегатов, с разными эксплуатационными характеристиками, близкими к реально существующим агрегатам поворотно-лопастного типа (табл. 1, рис. 2). Число агрегатов выбрано небольшим для простоты и наглядности вычислений, однако легко показать, что увеличение числа агрегатов не оказывает влияния на результат. Распределение приведем на четырех экспериментальных заданиях ГЭС с неизменным напором:

- 1) вблизи максимального КПД;
- 2) при максимальном КПД;
- 3) вблизи минимума диапазона регулирования;
- 4) вблизи максимума диапазона регулирования.

Каждый агрегат имеет разные ограничения (диапазоны регулирования) и достигает максимума КПД = 92% при разной мощности: ГА1 при 40 МВт, ГА2 при 60 МВт и ГА3 при 90 МВт.

Каждый эксперимент опишем параметрами:

- 1) общее задание на ГЭС;
- 2) задание на каждый гидроагрегат, при котором сумма по агрегатам равна общему заданию ГЭС;
- 3) КПД агрегатов при заданной мощности;
- 4) потенциальные потери ГА и ГЭС, подробно рассмотрены в работе [4].

Равенство мощностей

Это самый распространенный способ распределения мощностей, внедренный на многих гидроэлектростанциях. Его популярность обусловлена простотой и наглядностью — все агрегаты имеют одинаковую мощность. Это легко проверить, легко просчитать

и убедиться, что задание на станцию выполняется верно, также видно, какой агрегат не справляется с поставленным заданием.

Этот вариант подходит для ГЭС, где все или значительное большинство агрегатов имеют одинаковые эксплуатационные характеристики.

Задание на каждый агрегат формируется итеративно:

$$1) P_{ГА} = \frac{P_{ГРАМ}}{N};$$

2) если для i -го агрегата $P_{ГА} > P_{max_{ГАi}}$, то этот агрегат помечают “на ограничении”, вычисляют $\Delta_i = P_{ГА} - P_{max_{ГАi}}$ и принимают $P_{ГА} = P_{max_{ГАi}}$;

3) если для i -го агрегата $P_{ГА} < P_{min_{ГАi}}$, то этот агрегат помечают “на ограничении”, вычисляют $\Delta_i = P_{ГА} - P_{min_{ГАi}}$ и принимают $P_{ГА} = P_{min_{ГАi}}$;

4) считается число агрегатов, находящихся не на ограничении K , а также недораспределенная мощность $\Delta = \sum \Delta_i$;

5) если $\Delta = 0$ — распределение окончено, в противном случае

$$P_{ГРАМ} = \sum_{i=1}^K P_{ГАi} + \Delta$$

и снова все повторяется с шага 1 только над агрегатами, находящимися не на ограничении $N=K$.

Пример распределения мощности приведен в табл. 2. В колонке “ГЭС” приведены суммарные значения параметров по станции (ГРАМ). В экспериментах 3 и 4 равенства мощностей не получилось из-за ограничений агрегатов. Обратим внимание

Таблица 2. Равенство мощностей. Эксперименты.

	ГА1	ГА2	ГА3	ГЭС
Эксперимент 1. Распределить задание 150 МВт.				
Задание ГРАМ, МВт	150			
Мощность ГА, МВт	50	50	50	150
КПД ГА, %	91,5	90,9	89,2	
Потенциальные потери, МВт	-0,25	-0,55	-1,41	-2,21
Эксперимент 2. Распределить задание 190 МВт.				
Задание ГРАМ, МВт	190			
Мощность ГА, МВт	63,33	63,33	63,33	190
КПД ГА, %	90,7	91,9	90,1	
Потенциальные потери, МВт	-0,84	-0,07	-1,19	-2,11
Эксперимент 3. Распределить задание 260 МВт.				
Задание ГРАМ, МВт	260			
Мощность ГА, МВт	80,0	90,0	90,0	260
КПД ГА, %	89,0	91,7	92,0	
Потенциальные потери, МВт	-2,40	-0,30	0,00	-2,70
Эксперимент 4. Распределить задание 38 МВт.				
Задание ГРАМ, МВт	38			
Мощность ГА, МВт	8,0	10,0	20,0	38
КПД ГА, %	86,5	86,5	87,1	
Потенциальные потери, МВт	-0,44	-0,55	-0,99	-1,97

Таблица 3. Долевое равенство диапазонов. Эксперименты.

	ГА1	ГА2	ГА3	ГЭС
Эксперимент 1. Распределение 150 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	150			
Коэффициент	50%			
Мощность ГА, МВт	40	50	60	150
КПД ГА, %	92	90,9	89,9	
Потенциальные потери, МВт	0,00	-0,55	-1,27	-1,82
Эксперимент 2. Распределение 190 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	190			
Коэффициент	67%			
Мощность ГА, МВт	53,3	63,3	73,3	190
КПД ГА, %	91,3	91,9	90,8	
Потенциальные потери, МВт	-0,36	-0,07	-0,86	-1,29
Эксперимент 3. Распределение 260 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	260			
Коэффициент	96%			
Мощность ГА, МВт	76,7	86,7	96,7	260
КПД ГА, %	89,3	90,6	91,3	
Потенциальные потери, МВт	-2,04	-1,25	-0,64	-3,94
Эксперимент 4. Распределение 38 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	38			
Коэффициент	3%			
Мощность ГА, МВт	2,7	12,7	22,7	38
КПД ГА, %	85,6	86,8	87,2	
Потенциальные потери, МВт	-0,17	-0,65	-1,08	-1,90

Таблица 4. Равенство отклонений от максимального КПД. Эксперименты.

	ГА1	ГА2	ГА3	ГЭС
Эксперимент 1. Распределение 150 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	150			
Мощность ГА, МВт	26,7	46,67	76,67	150
КПД ГА, %	89,71	90,5	91,1	
Мощность с макс КПД, МВт	40	60	90	190
Потенциальные потери, МВт	-0,61	-0,68	-0,72	-2,0
Эксперимент 2. Распределение 190 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	190			
Мощность ГА, МВт	40	60	90	190
КПД ГА, %	92,0	92,0	92,0	
Потенциальные потери, МВт	0,00	0,00	0,00	0,00
Эксперимент 3. Распределение 260 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	260			
Мощность ГА, МВт	69,99	89,99	100	260
КПД ГА, %	90,0	91,7	91,0	
Потенциальные потери, МВт	-1,40	-0,30	-1,00	-2,7
Эксперимент 4. Распределение 38 МВт				
Задание ГРАМ, МВт	38			
Мощность ГА, МВт	0	10	28	38
КПД ГА, %	85,1	86,5	87,6	
Потенциальные потери, МВт	0,00	-0,55	-1,23	-1,8

на то что в экспериментах при любом задании ГЭС, потенциальные потери агрегатов достаточно значительны, более того из-за разных эксплуатационных характеристик агрегатов не существует такого задания, при котором бы потенциальные потери ГЭС стремились к нулю.

Достоинства этого метода.

1) Простота — минимум вычислений, эксплуатирующий персонал легко может повторить и проверить алгоритм расчета.

Недостатки.

1) Применим только для ГЭС с одинаковыми или близкими характеристиками ГА. В общем случае для ГЭС с разными типами ГА невозможно добиться потенциальных потерь = 0.

2) Сложность учета индивидуальных зон ограниченной и запрещенной работы.

3) В случае выхода агрегатов на ограничение регулирование мощностью осуществляется за счет остальных агрегатов, таким образом уменьшается скорость реакции станции на внешнее задание.

Для учета этих недостатков агрегаты можно объединить в группы по диапазонам регулирования, по эксплуатационным характеристикам и т. д., но сложность алгоритмов управления существенно возрастет.

Долевое равенство диапазонов регулирования

Смысл распределения по долевному равенству диапазонов агрегатов не исключить или минимизировать работу агрегатов на ограничениях, а выполнять задание всеми агрегатами пропорционально их диапазону регулирования.

В этом случае рассчитывается имеющийся диапазон регулирования по ГЭС:

$$DP = \sum_{i=1}^N (P_{max_{ГАi}} - P_{min_{ГАi}}) \text{ и коэффициент:}$$

$$\alpha = \frac{P_{ГРАМ} - \sum_{i=1}^N P_{min_{ГАi}}}{DP}$$

Тогда задание на агрегаты будет равно:

$$P_{ГАi} = \alpha * (P_{max_{ГАi}} - P_{min_{ГАi}}) + P_{min_{ГАi}}$$

Пример распределения мощности приведен в табл. 3. Достоинства метода.

1) Простота — минимум вычислений, эксплуатирующий персонал легко может повторить и проверить алгоритм расчета.

2) Применим для ГЭС с любыми эксплуатационными характеристиками ГА и диапазонами.

3) Легко учесть индивидуальные зоны ограниченной и запрещенной работы: в этом случае в формулу подставляются минимальная и максимальная граница данной зоны регулирования ГА.

4) На ограничение выходят все агрегаты сразу, и все сразу сходят с ограничения. За счет этого всегда

участвуют в регулировании все агрегаты, скорость реакции — максимальна.

Недостатки: не учитывает КПД ГА. В общем случае для ГЭС с разными эксплуатационными характеристиками невозможно добиться потенциальных потерь = 0. Для учета этого недостатка агрегаты можно объединить в группы по диапазонам регулирования, по эксплуатационным характеристикам и т.д., но сложность алгоритмов управления существенно возрастет.

Равенство отклонений от максимального КПД

Идея заключается в том, что по возможности агрегаты должны стремиться к состоянию работы на максимальном КПД, а любое отклонение от максимального КПД делится поровну между агрегатами.

Для каждого ГА вычисляется $P_{GAi \max \eta}$ по эксплуатационной характеристике ГА. Затем определяется идеальное задание на ГЭС:

$$P_{ГЭС \max \eta} = \sum_{i=1}^N P_{GAi \max \eta}.$$

После чего задание на ГА определяется итеративно:

$$1) P_{GAi} = P_{GAi \max \eta} + \frac{P_{ГЭС \max \eta} - P_{ГРАМ}}{N};$$

2) если для i -го агрегата $P_{GA} > P_{\max GAi}$, то этот агрегат помечают “на ограничении”, вычисляют $\Delta_i = P_{GA} - P_{\max GAi}$ и принимают $P_{GA} = P_{\max GAi}$;

3) если для i -го агрегата $P_{GA} < P_{\min GAi}$, то этот агрегат помечают “на ограничении”, вычисляют $\Delta_i = P_{GA} - P_{\min GAi}$ и принимают $P_{GA} = P_{\min GAi}$;

4) считается число агрегатов не на ограничении — K , а также недораспределенная мощность ГЭС $\Delta = \sum \Delta_i$;

5) если $\Delta = 0$ — распределение окончено, в противном случае

$$P_{ГРАМ} = \sum_{i=1}^K P_{GAi} + \Delta$$

и снова все повторяется с шага 1 только над агрегатами, находящимися не на ограничении $N=K$.

Пример распределения мощности приведен в табл. 4.

Важным отличительным результатом этого метода является принципиальная возможность достижения нулевого уровня потенциальных потерь ГЭС, что проиллюстрировано экспериментом № 2.

Достоинства метода:

1) учитывает КПД ГА. В общем случае для ГЭС с разными типами ГА возможно добиться потенциальных потерь = 0.

2) применим для ГЭС с любыми эксплуатационными характеристиками ГА, любыми диапазонами.

Недостатки:

1) сложность — много вычислений, причем часть зависит от постоянно меняющегося напора.

2) сложно учесть индивидуальные зоны ограниченной и запрещенной работы.

Таблица 5. Равенство отклонений от максимального КПД. Эксперименты.

	ГА1	ГА2	ГА3	ГЭС
Эксперимент 1. Распределение 150МВт				
Задание ГРАМ, МВт	150			
Коэффициент	-25%			
Мощность ГА, МВт	30,00	47,50	72,50	150
КПД ГА	90,28	90,6	90,8	
Потенциальные потери	-0,51	-0,65	-0,90	-2,06
Эксперимент 2. Распределение 190МВт				
Задание ГРАМ, Мвт	190			
Коэффициент	0%			
Мощность ГА, МВт	40,00	60,00	90,00	190
КПД ГА, %	92,0	92,0	92,0	
Потенциальные потери, МВт	0,00	0,00	0,00	0,00
Эксперимент 3. Распределение 260МВт				
Задание ГРАМ, МВт	260			
Коэффициент	88%			
Мощность ГА, МВт	75,00	86,25	98,75	260
КПД ГА, %	89,5	90,4	91,1	
Потенциальные потери, МВт	-1,88	-1,37	-0,86	-4,10
Эксперимент 4. Распределение 38МВт				
Задание ГРАМ, МВт	38			
Коэффициент	-95%			
Мощность ГА, МВт	2,00	12,50	23,50	38
КПД ГА, %	85,5	86,8	87,3	
Потенциальные потери, МВт	-0,13	-0,65	-1,10	-1,88

3) скорость реакции ГЭС зависит напрямую от количества агрегатов не на ограничении.

Для учета этого недостатка агрегаты можно объединить в группы по диапазонам регулирования, по эксплуатационным характеристикам и т.д., но сложность алгоритмов управления существенно возрастет.

Долевое равенство диапазонов загрузки и разгрузки от максимального КПД

Идея аналогична, описанной в п. 2. Отличие заключается в фиксации целевого состояния ГА (мощность с максимальным КПД), а отклонение от задания делится пропорционально диапазонам на загрузку или на разгрузку.

Аналогично предыдущему метод позволяет распределить мощность по агрегатам так, чтобы добиться снижения потенциальных потерь ГЭС до нуля (эксперимент № 2), а кроме того, за счет динамики добиться наивысочайшей скорости реакции на задание ГЭС. Пример распределения мощности приведен в табл. 5.

Для каждого ГА вычисляется $P_{GAi \max \eta}$ по эксплуатационной характеристике ГА. Затем определяется идеальное задание на ГЭС и имеющийся диапазон регулирования по ГЭС на загрузку и на разгрузку:

$$P_{ГЭСmax\eta} = \sum_{i=1}^N P_{ГAi max\eta},$$

$$DP_{загрузка} = \sum_{i=1}^N (P_{max\Gamma Ai} - P_{ГAi max\eta}),$$

$$DP_{разгрузка} = \sum_{i=1}^N (P_{ГAi max\eta} - P_{min\Gamma Ai}),$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ГРАМ} > P_{ГЭСmax\eta}: \alpha_{загрузки} = \frac{P_{ГРАМ} - P_{ГЭСmax\eta}}{DP_{загрузка}} \\ P_{ГAi} = P_{ГAi max\eta} + \alpha_{загрузки} (P_{max\Gamma Ai} - P_{ГAi max\eta}), \\ \text{иначе: } \alpha_{разгрузки} = \frac{P_{ГРАМ} - P_{ГЭСmax\eta}}{DP_{разгрузка}} \\ P_{ГAi} = P_{ГAi max\eta} + \alpha_{разгрузки} (P_{ГAi max\eta} - P_{min\Gamma Ai}) \end{array} \right.$$

Достоинства метода.

1) Учитывает КПД ГА. В общем случае для ГЭС с разными типами ГА возможно добиться потенциальных потерь = 0. Из этого же следует удобство регулирования, в процессе вычислений формируется идеальная мощность для действующего состава оборудования ГЭС, которую может учесть и станция, и системный оператор в своей работе.

2) Применим для ГЭС с любыми эксплуатационными характеристиками ГА, любыми диапазонами.

3) Можно учесть индивидуальные зоны ограниченной и запрещенной работы: в этом случае в формулы подставляются ограничения текущей зоны ограниченной работы.

4) Скорость реакции максимальна, поскольку регулирование осуществляется всеми агрегатами сразу. На ограничения выходят также все агрегаты одновременно.

Недостатки: сложность — много вычислений, причем часть зависит от постоянно меняющегося напора.

Заключение

Предложены три новые альтернативные функции распределения активной мощности для группового регулятора ГЭС, каждая из которых обладает целым

Виталий Евгеньевич Захарченко — канд. техн. наук, начальник отдела программирования,
Артем Андреевич Сидоров — технический директор ООО НВФ "Сенсоры. Модули. Системы".

Контактный телефон +7(846) 993-83-83.

E-mail: vitaliy.zakharchenko@sms-a.ru artem.sidorov@sms-a.ru
<http://смс.рф>

рядом преимуществ над традиционно сложившимся распределением по равенству мощностей.

Приведены алгоритмы распределения мощностей, их работа проиллюстрирована примерами. Всем сформулированным требованиям удовлетворяет функция распределения по долевному равенству диапазонов загрузки и разгрузки от максимального КПД. Групповое регулирование на основе этой функции распределения мощности учитывает индивидуальные особенности гидроагрегатов и повышает эффективность ГЭС.

Представленные функции распределения мощности позволяют без организационных и структурных изменений существенно повысить эффективность ГЭС за счет изменения программного обеспечения систем группового регулирования активной мощности, а также учесть в алгоритмах многозонные агрегаты и агрегаты с разными эксплуатационными характеристиками. Таким образом, результаты работы могут быть применены на любой ГЭС для любого типа гидроагрегата. Важно также то, что изменение функции распределения мощности системы ГРАМ не влияет на изменение состава оборудования, соответственно не расходует ресурс оборудования, не требует внедрения новой системы, как в случае с системой РУСА, но вместе с тем позволяет добиться улучшения эффективности работы ГЭС. Несложно видеть, что сочетание подходов системы РУСА и оптимизации функции распределения мощности системы ГРАМ позволяют значительно улучшить эффективность ГЭС.

Список литературы

1. Филиппова Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов электростанций. Энергия. Москва. 1975. 207с.
2. Секретарев Ю.А., Жданович А.А., Мосин К.Ю. Ситуационное управление составом и режимами гидроагрегатов на электростанциях. Монография. Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета. Саяногорск-Черемушки. 2013. 151с.
3. Шавелев Д.С. Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции). Л. 1981.
4. Захарченко В.Е. Основной критерий автоматизированного рационального управления составом агрегатов ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2017. №9.
5. Захарченко В.Е. Техничко-экономическое обоснование автоматизированной системы рационального управления составом агрегатов ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2017. №11.

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

через каталоги "Роспечать" 81874 и "Пресса России" 39206 • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru